



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH DIAGNOSTIKY OBRÁBĚCÍHO PROCESU

DESIGN OF MACHINING PROCESS DIAGNOSTIC SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jonatan Wolf

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lubomír Houfek, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky |
| Student: | Bc. Jonatan Wolf |
| Studijní program: | Aplikované vědy v inženýrství |
| Studijní obor: | Inženýrská mechanika a biomechanika |
| Vedoucí práce: | Ing. Lubomír Houfek, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2019/20 |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh diagnostiky obráběcího procesu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede kompletní návrh platformy pro online monitorování obráběcího procesu, včetně volby vhodné senzoriky a PLC. Součástí práce bude i tvorba softwarového rozhraní a experimentální ověření funkčnosti celé platformy při experimentálním obrábění.

Cíle diplomové práce:

1. Provedení teoretické rešerše dané problematiky.
2. Návrh vhodné senzoriky a HW.
3. Umístění senzorů na obráběcí stroj.
4. Tvorba softwarového rozhraní.
5. Experimentální ověření funkčnosti platformy.
6. Závěry.

Seznam doporučené literatury:

DIMLA, E. a Snr. DIMLA. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - a review of methods. Machine Tools & Manufacture [online]. 1999, č. 40, s. 1073-1098.

HUANG, S. N., K. K. TAN, Y. S. WONG, C. W. DE SILVA, H. L. GOH a W. W. TAN. Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring. International Journal of Machine Tools and Manufacture [online]. 2006, s. 444-451.

TETI, R., K. JEMIELNIAK, G. O'DONNELL a D. DORNFELD. Advanced monitoring of machining operations. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2010, č. 59, s. 717-739.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Práce je zaměřena na online diagnostiku obráběcího procesu. V teoretické části jsou představeny možnosti údržby a diagnostiky obráběcích strojů. Samostatná kapitola je věnována vibrodiagnostice, ve které jsou popsány senzory vibrací, jejich upevnění k měřenému objektu a způsoby zpracování signálu vibrací. Praktická část spočívá ve vytvoření softwarového řešení diagnostiky pro zvolené PLC a senzory. Funkčnost navrženého systému byla ověřena při experimentálním obrábění, které zároveň poskytlo cenná data pro správné nastavení systému.

Klíčová slova

diagnostika obráběcího procesu, online monitorování, vibrodiagnostika, PLC, prediktivní údržba

Abstract

The master's thesis is focused on online diagnostics of the machining process. In the theoretical part are presented maintenance possibilities of machine tools. A whole chapter is devoted to vibrodiagnostics, which describes vibration sensors, their attachment to the measured object and methods of vibration signal processing. The practical part lies in creating a software diagnostic solution for chosen PLC and sensors. The functionality of the proposed system was verified during experimental machining, which also provided valuable data for the correct setting of the system.

Keywords

diagnostics of machining process , online monitoring, vibrodiagnostics, PLC, predictive maintenance

Bibliografická citace

WOLF, Jonatan. *Návrh diagnostiky obráběcího procesu*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121768>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Lubomír Houfek.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma Návrh diagnostiky obráběcího procesu vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lubomíra Houfka, Ph.D. s využitím vlastních znalostí a uvedených zdrojů.

Poděkování

Rád bych velice poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Lubomíru Houfkovi, Ph.D., za vstřícnost, trpělivost a cenné rady při vedení. Dále bych rád poděkoval výzkumnému a vývojovému centru INTEMAC, za poskytnutí hardwaru a softwaru pro řešení této práce a za spolupráci při experimentálním obrábění. Za uvedení do problematiky diagnostiky strojů a konzultace děkuji kolegovi Ing. Zdeňku Fialovi, Ph.D.

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 11 |
| 2 | Údržba..... | 12 |
| 2.1 | Historie | 12 |
| 2.2 | Dělení údržby..... | 12 |
| 2.2.1 | Údržba po poruše (korekční)..... | 13 |
| 2.2.2 | Preventivní údržba | 13 |
| 2.2.3 | Prediktivní údržba..... | 13 |
| 2.3 | Technická diagnostika | 14 |
| 2.3.1 | Termodiagnostika..... | 14 |
| 2.3.2 | Tribotechnická diagnostika | 15 |
| 2.3.3 | Diagnostika pomocí příkonu pohonných jednotek | 15 |
| 2.3.4 | Diagnostika pomocí řezných sil | 15 |
| 2.3.5 | Akustická diagnostika | 16 |
| 2.3.6 | Vibrodiagnostika | 17 |
| 3 | Vibrodiagnostika..... | 18 |
| 3.1 | Typy kmitání | 18 |
| 3.1.1 | Volné kmitání..... | 19 |
| 3.1.2 | Buzené kmitání..... | 19 |
| 3.1.3 | Samobuzené kmitání..... | 20 |
| 3.2 | Měření vibrací | 20 |
| 3.2.1 | Snímače výchylky..... | 21 |
| 3.2.2 | Snímače rychlosti (velometry) | 22 |
| 3.2.3 | Snímače zrychlení (akcelerometry) | 22 |
| 3.2.4 | Způsoby upevnění akcelerometru k měřenému objektu | 24 |
| 3.3 | Zpracování signálu vibrací | 25 |
| 3.3.1 | Analýza v časové oblasti | 25 |
| 3.3.2 | Analýza ve frekvenční oblasti | 26 |
| 4 | Analýza řešeného problému..... | 30 |
| 4.1 | Problémová situace: | 30 |
| 4.2 | Formulace problému:..... | 30 |
| 4.3 | Cíle řešeného problému: | 30 |
| 4.4 | Systém podstatných veličin | 30 |
| 4.5 | Výběr metody řešení..... | 31 |
| 5 | Návrh platformy pro monitorování obráběcího procesu..... | 32 |
| 5.1 | Výběr hardwarového vybavení | 32 |
| 5.2 | Tvorba softwarového řešení | 37 |

| | | |
|-------|---|--|
| 5.2.1 | Konfigurace modulů vstupních signálů | 38 |
| 5.2.2 | Tvorba programů a algoritmů..... | 39 |
| 5.2.3 | Vizualizace sledovaných dat..... | 42 |
| 6 | Experimentální ověření funkčnosti platformy | 44 |
| 6.1 | Ověření správnosti použitých principů | 44 |
| 6.1.1 | Měření opotřebení..... | 46 |
| 6.1.2 | Měření vibrací a hluku..... | 48 |
| 7 | Závěr | 57 |
| 8 | Seznam použitých zdrojů..... | 59 |
| 9 | Seznam použitých zkratk a symbolů..... | 62 |
| | Seznam obrázků..... | 64 |
| | Seznam tabulek..... | 66 |
| | Seznam příloh..... | Chyba! Záložka není definována. |

1 Úvod

V dnešní době patří obrábění k nejdůležitějším výrobním technologiím, zejména díky schopnosti vytvářet obrobky různých tvarů a velikostí s vysokými požadavky na rozměrové a tvarové přesnosti a na drsnost povrchu. Právě vysokou přesností a jakostí povrchů se odlišuje od ostatních technologických metod (např. tváření, svařování, 3D tisk kovů). Tyto výhody jsou však vykoupeny náročností na strojní vybavení, výrobní časy, odbornost pracovníků a organizaci technologického pochodu, což dohromady způsobuje poměrnou finanční náročnost obrábění.

V této souvislosti je kladen stále větší důraz na zvyšování produktivity a spolehlivosti obráběcích procesů a současné snížení nároků a nákladů na obsluhu obráběcích strojů. Toho bývá v praxi docíleno použitím samočinných řídicích systémů, robotizací a v oblasti údržby využitím online monitorovacích systémů. Ty na základě sledování některých charakteristik obráběcího procesu pomáhají předejít výrobě zmetků a náhlým poruchám, které způsobují neplánované odstávky a mohou způsobit i další poškození některých částí obráběcího stroje. Zároveň je dosaženo maximálního využití technického života stroje a jeho součástí.

Právě potřeba vývoje systému pro online diagnostiku obráběcího procesu je podnětem k vypracování této práce.

2 Údržba

2.1 Historie

Ne vždy byl kladen takový důraz na údržbu strojů jako dnes. Od do průmyslové revoluce až do 40. let 20. století byly stroje obecně velké, drsné, robustní a relativně pomalé, pouze se základními řídicími systémy a přístrojovým vybavením. V důsledku toho byly relativně spolehlivé a jejich případná oprava při poruše nebyla příliš složitá. Prostroje nebyly tak zásadním problémem jako dnes. Proto se u těchto strojů uplatňovala tzv. reaktivní údržba, kdy se během provozu stroje žádná údržba neprovádí a porucha se diagnostikuje a opravuje až po jejím projevení. Dodnes je tento typ údržby využíván u strojů, jejichž případná nečekaná odstávka není zásadním problémem ve výrobním procesu. [1]

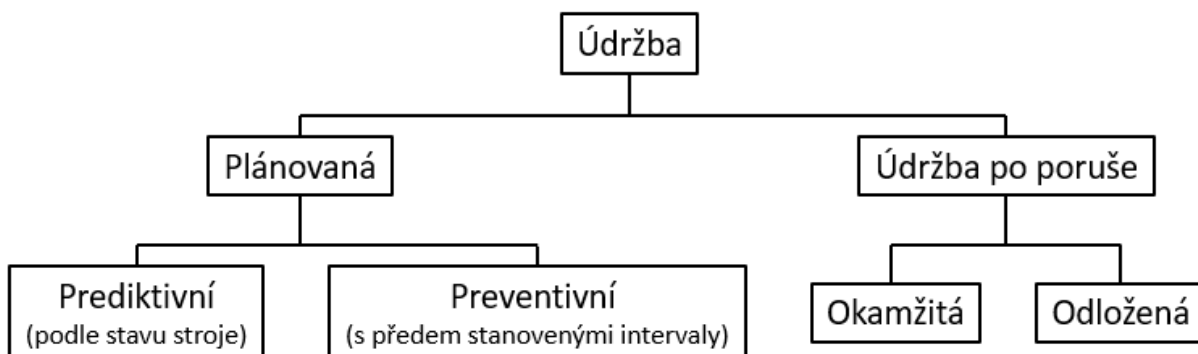
Po druhé světové válce výrazně vzrostly náklady na lidskou práci, což vedlo k stále větší mechanizaci a automatizaci (vývoj NC, CNC, robotizace atd.). Spolu s výrazným technologickým vývojem (např. v oblasti letectví a kosmického inženýrství, které se později přeneslo i do dalších oblastí), rozvojem celosvětové ekonomiky, a tedy i zvýšením poptávky po zboží, bylo vyvinuto strojní zařízení lehčí konstrukce, které dosahovalo vyšších výkonů, rychlostí a lepších vlastností výrobku. Prostroje při výrobě způsobené poruchami strojů se staly významným problémem, opravy strojů se staly náročnějšími a nákladnějšími. To vedlo k vývoji preventivní údržby založené na plánovaných kontrolách dle předem stanoveného časového plánu. [1]

Spolu s vývojem výpočetní techniky se otevřely nové možnosti pro údržbu a diagnostiku strojů. Proto se přibližně od 80. let začala uplatňovat prediktivní údržba, založená na monitorování stavu stroje, sledování trendů a předpovědi možné poruchy stroje. [1]

V současnosti je významným trendem autodiagnostika, kdy jsou pomocí diagnostických jednotek sbírána data, automaticky zpracovávána a vyhodnocována v reálném čase. V dostatečném předstihu jednotka samostatně nahlásí potřebu např. provedení údržbářského výkonu nebo výměny součásti. Tento přístup je součástí celého konceptu digitalizace průmyslové výroby, obecně známého jako „*Průmysl 4.0*“. Ten pomocí kyberneticko-fyzikálních systémů propojuje celý výrobní proces, díky senzorům, kamerám, vysílačům a čtečkám kódů spolu jednotlivé stroje dokáží komunikovat, předávat si informace a pokyny a do jisté míry se výrobní závody mohou řídit samy. [2]

2.2 Dělení údržby

Údržbu dělíme podle použitého přístupu. Norma ČSN EN 13306 uvádí základní členění údržby, jak je znázorněno obr. 1.



Obr. 1 Dělení údržby volně podle ČSN EN 13306 [3]

2.2.1 Údržba po poruše (korekční)

Jedná se o nejstarší typ údržby. Během samotného provozu se žádná údržba neprovádí, při výskytu poruchy řeší údržba její následky a návrat stroje do stavu, kdy je schopen plnit požadovanou funkci. Každá součást zařízení je tak využita až do konce své životnosti. Tento způsob údržby se vyznačuje nízkými náklady během samotného provozu zařízení, avšak při poruše jsou náklady na opravu poměrně vysoké. K tomu se přičítají ztráty způsobené výpadkem produkce, které mohou být v praxi i několikanásobně vyšší než náklady na samotnou opravu. Problémem jsou i bezpečnostní rizika. [4]

Údržbu po poruše lze dále dělit na okamžitou údržbu, kdy je stroj okamžitě odstaven a opraven, a odloženou údržbu, umožňující v případě potřeby omezený chod stroje v částečně poruchovém stavu do doby, kdy je možné provést odstávku a opravu.

2.2.2 Preventivní údržba

V případě preventivní údržby jsou prováděny pravidelné kontroly a údržbářské činnosti podle předem zadaného časového rozvrhu, který je sestaven na základě teoretické spolehlivosti jednotlivých součástí zařízení. Jde například o čištění, mazání, kontrolu a výměnu opotřebovaných dílů. Preventivní údržbou se buď zcela předejde případným poruchám, nebo se včas odhalí a je naplánována jejich oprava, čímž jsou eliminovány náhlé odstávky a výpadky produkce. Nevýhodou jsou značné náklady na plánované opravy. Ty se mohou často zdát jako nadbytečné, protože jsou nahrazovány zcela funkční díly novými a není využíváno jejich celého technického života. V porovnání s údržbou po poruše je zajištěna plynulost výroby, jsou mírně sníženy náklady na údržbu, které jsou zároveň rovnoměrně rozprostřeny v čase. [4]

2.2.3 Prediktivní údržba

Základem prediktivní údržby je nejlépe trvalé (příp. periodické) monitorování stroje pomocí měřených fyzikálních veličin – např. vibrací, hluku či teplot. Většina potenciálních poruch, mechanických ztrát nebo přetížení stroje se projeví právě v těchto veličinách. Průběžným sledováním těchto veličin v čase se určuje skutečný stav stroje, předpovídá se jeho vývoj a včas se odhalí potenciální porucha nebo problém. V případě zjištění blížící se poruchy jsou objednány potřebné díly a je naplánována odstávka stroje s dostatečnou časovým předstihem, čímž je zajištěno maximální využití technického života součástí. Časový předstih umožňuje naplánovat výrobu tak (např. zvýšením výroby před opravou), aby měla odstávka minimální dopady na návazné výrobní technologie, logistiku a prodeje zboží. [4] [5]

Z ekonomického hlediska je výhodou, že klesají náklady na samotnou údržbu na minimum díky maximálnímu využití technického života součástí. Naplánováním odstávky a údržby se navíc minimalizují druhotné ztráty způsobené případným výpadkem výroby. Délka odstávky zařízení potřebná k opravě je v porovnání s údržbou po poruše zcela zanedbatelná. Nevýhodou jsou vysoké počáteční náklady způsobené poměrně vysokou pořizovací cenou diagnostických systémů a také vyššími požadavky na technickou kvalifikaci pracovníků údržby. [4] [5]

Prediktivní údržba se využívá především při sériové výrobě, kde je velká provázanost výrobní technologie a případné náhlá odstávka jednoho stroje by znamenala zastavení celé výroby, což by vedlo k obrovským finančním ztrátám. [5]

Na základech prediktivní údržby jsou v dnešní době vyvíjeny automatizované diagnostické systémy. Jejich základem jsou programovatelné logické automaty, zkráceně PLC z anglického programmable logic controller, což jsou malé průmyslové počítače používané pro automatizaci procesů v reálném čase. Od běžných počítačů se liší tím, že program vykonávají v cyklech.

Díky možnostem upravování a rozšiřování jsou v dnešní době nejčastěji používány modulární systémy. Ty se skládají ze zdroje, CPU (z angl. Central Processing Unit) a speciálních modulů, přičemž každý z nich má svou vlastní funkci. Jde například o moduly pro řízení pohybu, komunikaci nebo sběr dat (digitální a analogové vstupy a výstupy, teplotní, vibrační, tenzometrické moduly atd.). Méně obvyklé jsou pak kompaktní systémy, kde jsou všechny zmíněné funkce obsaženy v jednom modulu, čímž je však omezena jeho variabilita. [6]

2.3 Technická diagnostika

Technická diagnostika je základem v systému preventivní a prediktivní údržby. Zabývá se metodami a prostředky k zjišťování stavu zařízení nebo strojů. Využívá zpravidla bezdemontážních a nedestruktivních postupů pro nalezení příčin a místa poruchy, případně pro predikci technického stavu stroje. Pro získávání informací o zkoumaném objektu jsou vyhodnocovány jeho vnější projevy, a to pomocí technických zařízení, např.: senzorů, testerů a pracovních postupů pro analýzu a vyhodnocení. [7]

Metod používaných pro diagnostikování technického stavu zařízení existuje mnoho, každá je však vhodná pro jiný typ zařízení. Nejpoužívanějšími metodami diagnostiky obráběcích strojů jsou termodiagnostika, tribotechnická diagnostika, akustická diagnostika a vibrodiagnostika.

2.3.1 Termodiagnostika

Termodiagnostika funguje na principu odhalování nadměrného oteplení a nehomogenit povrchových teplot, a to pomocí dotykového či bezdotykového měření teploty. V případě obráběcích strojů dochází k nadměrnému oteplení zpravidla v důsledku nadměrného tření nebo namáhání, což může vést ke zrychlenému opotřebení, zkrácení životnosti, poruchám a dalším poškozením. Nejčastěji bývá termodiagnostika využita ke kontrole ložisek, kuličkových šroubů, vřeten a motorů. [8] Na obrázku 2 znázorněno bezkontaktní měření teploty termokamerou.



Obr. 2 Měření pomocí termokamery [9]

2.3.2 Tribotechnická diagnostika

Tribotechnická diagnostika je bezdemontážní metoda. Sleduje a vyhodnocuje stav maziva ve stroji, konkrétně výskyt cizích látek v mazivu (především kovových částic uvolněných ze třecích ploch) a také stárnutí (degradaci) samotného maziva. Tím jsou získávány informace o dějích, procesech a mechanických změnách ve sledovaném stroji a je možné naplánovat potřebnou jeho opravu nebo výměnu maziva podle skutečného stavu. [10]

2.3.3 Diagnostika pomocí příkonu pohonných jednotek

Příkon obráběcího stroje, případně pouze některého z jeho pohonů, lze měřit snadno pomocí wattmetrů bez nutnosti zásahu do pracovního prostoru stroje. Celkový příkon stroje se skládá ze tří základních složek: [11]

- Příkon potřebný k překonání pasivních odporů stroje při chodu naprázdno
- Příkon potřebný pro dosažení hlavního pohybu (překonání odporu obráběného materiálu proti hlavnímu pohybu)
- Příkon potřebný pro dosažení posuvu (překonání odporu obráběného materiálu proti posuvu) - oproti předchozím dvěma bývá zpravidla zanedbatelný

Nestandardní změna příkonu může značit problém při obrábění, např. špatné upnutí nástroje, poškození nástroje (např. ulomení). Příkon může být ovlivněn řadou faktorů, jako je teplota elektrického vedení a motoru nebo zvýšení tření v pohyblivých součástech stroje (stárnutí, nedostatečné mazání). Proto je bez dalších informací obtížné určit přesnou příčinu změny elektrického příkonu. Jeho měření je vhodné použít jako doplněk k jiným metodám monitorování obráběcího procesu. Naopak výhodou této metody jsou nízké pořizovací a provozní náklady.

2.3.4 Diagnostika pomocí řezných sil

K měření řezných sil slouží dynamometry, které jsou zpravidla založeny na piezoelektrickém principu. Nejpoužívanějšími typy jsou deskový (obr. 2 vlevo), používaný pro upnutí soustružnických nožů a držáků destiček, a rotační (obr. 2 vpravo), sloužící pro upnutí nástroje se stopkou, například vrtáku či frézy. [12], [13]



Obr. 3 Typy dynamometrů – vlevo deskový, vpravo rotační [13]

Moderní měřicí systémy řezných sil jsou schopné přesně určit vektor působících sil, odhalit příčinu nárůstu sil a doporučit vhodná opatření. Zároveň však existuje řada nevýhod této metody, mezi něž patří omezená šířka pásma senzoru, vliv otáček vřetena na přesnost měření a omezená použitelnost dynamometrů pro nástroje daných tvarů a rozměrů. Univerzálnost lze v praxi zvýšit pomocí redukčních součástí, které však způsobují snížení tuhosti obráběcí soustavy. Dalším problémem dynamometrů jsou jejich rozměry, které omezují možnosti obrábění například vnitřních ploch. Přestože jsou tyto systémy hluboce propracované, vyšší přesnost detekce poruch a problémů při obrábění mají metody založené na měření vibrací a hluku. [12]

2.3.5 Akustická diagnostika

Akustická diagnostika měří a vyhodnocuje akustický signál neboli hluk, a to pomocí mikrofónů a hlukoměrů. Ten bývá zpravidla umístěn v blízkosti diagnostikované oblasti, např. analyzujeme-li samotný obráběcí proces, umísťuje se senzor v blízkosti nástroje. Problémem je ovlivnění měřeného signálu jinými zdroji hluku. Tento problém lze částečně řešit pomocí filtrace signálu.

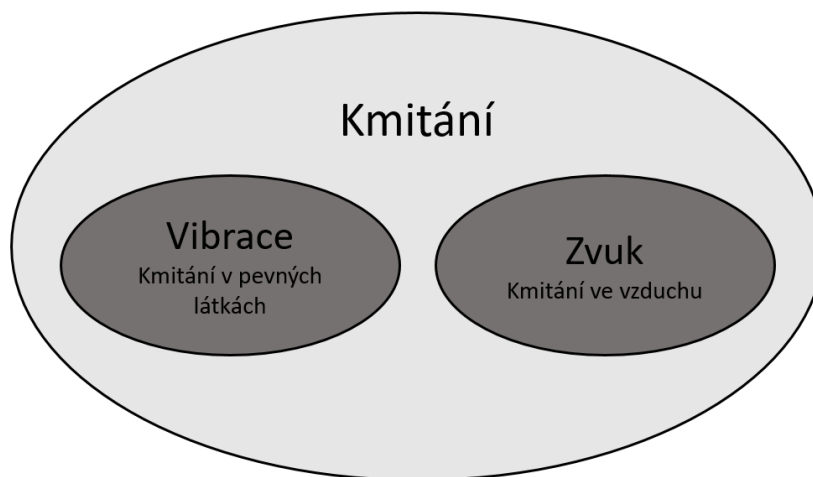
V průběhu obrábění je nejsilnějším zdrojem hluku uvolňující se energie při deformaci obrobku a tření mezi nástrojem a obrobkem. Proto lze akustickou diagnostiku úspěšně použít pro sledování opotřebení nástroje. [14] Na obrázku 4 je ukázka mikrofónu firmy Brüel & Kjær.



Obr. 4 Mikrofon výrobce Brüel & Kjær [15]

2.3.6 Vibrodiagnostika

Kmitání (vibrace) stroje jsou pevně spjaté s hlukem. Hluk vzniká vibracemi stroje, které na povrchu stroje rozkmitávají vzduch. Vibrace i hluk jsou tedy z fyzikálního pohledu kmitáním, liší se pouze prostředím, ve kterém se šíří (obr. 5). Vibrace lze snadněji měřit na konkrétních místech, než se mezi částmi stroje tak snadno, jako hluk ve vzdušném prostředí. Proto se v praxi častěji využívá metoda zkoumající vibrace stroje, tedy vibrodiagnostika.



Obr. 5 Rozdělení kmitání podle prostředí

Vibrodiagnostika je bezdemontážní nedestruktivní metodou pro monitorování technického stavu rotačních strojů. Měřením a vyhodnocováním vibrací lze odhalit náhlou poruchu nebo teprve vznikající závadu, lokalizovat ji a predikovat zbývající čas do poruchy. Jejím využitím lze zjistit aktuální technický stav stroje, optimalizovat údržbu s cílem zvýšit spolehlivost, bezpečnost a životnost, a tím snížit náklady na údržbu a opravy. V dnešní době je vibrodiagnostika nejpoužívanější metodou v moderních prediktivních systémech údržby. [14] Z těchto důvodů bude vibrodiagnostika základním kamenem praktické části této práce a jejím základům bude věnována samostatná následující kapitola.

3 Vibrodiagnostika

Vibrace (též chvění) jsou projevem mechanického kmitání stroje. To je charakterizováno periodickou změnou polohy stroje, nebo jeho části, kolem rovnovážné polohy. Kmitání je nedílnou součástí každého obráběcího procesu. V obvyklých mezích nemá na samotný stroj ani výsledný produkt zásadní vliv, a lze jej tedy tolerovat. Zvýšení vibrací může zhoršovat kvalitu obrobené plochy (vznik vlnitosti, zhoršená drsnost povrchu), urychlit opotřebení nástroje (vylamování břitů, celková destrukce nástroje), urychlit opotřebení součástí obráběcího stroje a zhoršovat pracovní prostředí (silný hluk). [16]

3.1 Typy kmitání

Kmitání lineární soustavy s jedním stupněm volnosti lze obecně popsat pohybovou rovnicí v následujícím tvaru:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = mg + F(t) \quad (3.1)$$

kde m je hmotnost tělesa, b koeficient tlumení, k tuhost, g gravitační zrychlení, $F(t)$ popisuje budící sílu a x je obecná souřadnice. Tato obecně platná rovnice se dále upravuje pro jednotlivé typy kmitání vyjádřením nebo vynecháním některého z členů rovnice [17].

Rozdělení signálů vibrací se provádí dle různých hledisek: [17], [18]

- Podle kinematického hlediska:
 - Periodické: po určitém časovém intervalu se opakují, základním periodickým kmitáním je harmonické kmitání.
 - Neperiodické (aperiodické): neobsahují žádné periodické složky, mezi neperiodické řadíme například přímočarý pohyb nebo aperiodické tlumené kmity.
- Podle tlumení kmitů:
 - Netlumené: nedochází k tlumení kmitavého pohybu a tedy ani ke ztrátě energie.
 - Tlumené: část energie kmitů se ztrácí vlivem vnějšího (např. aerodynamický a hydrodynamický odpor a odpor tlumičů) a vnitřního tlumení (např. materiálové tlumení a tlumení ve vazbách).
- Podle vlivu buzení:
 - Volné
 - Buzené
 - Samobuzené

Vliv budící síly je zásadní pro soustavu obrábění stroj-nástroj-obrobek, a proto bude podrobněji rozebrán v následující části.

3.1.1 Volné kmitání

Volné kmitání, jak už ze samotného názvu vyplývá, spočívá ve vychýlení z rovnovážné polohy, uvolnění a ponechání ve volném pohybu bez buzení. Prvotní impuls může být udělen jednomu nebo i více hmotným tělesům. Volné kmitání lze popsat pomocí homogenních pohybových rovnic a nenulové počáteční podmínky. [17]

3.1.2 Buzené kmitání

O vynuceném kmitání mluvíme v případě, je-li kmitání vyvoláno a udržováno účinkem budících sil. Buzení dělíme dle průběhu budící síly v čase na [17],[18]:

- Deterministické
 - Periodické – budící síla je periodickou funkcí času (její hodnota se po určitém čase opakuje), jsou složeny z celočíselných násobků harmonických funkcí
 - Kvaziperiodické
 - Přechodné
 - Pseudonáhodné
- Stochastické (náhodné)

Při analýze náhodného signálu se využívají pouze statistické charakteristiky. Podle toho, jestli se charakteristiky signálu mění v čase, rozlišujeme náhodné signály stacionární (nemění se), nestacionární (mění se) a cyklostacionární (mění se cyklicky). Stochastické buzení se vyskytuje např. u leteckých konstrukcí, dopravních prostředků, dílů vystavených proudu tekutiny apod.

Vynucené kmitání je v praxi velmi časté, přičemž zdrojů periodické budící síly v obráběcím stroji je mnoho [19],[20]:

- mechanické zdroje:
 - obráběcí stroj:
 - nevyváženost rotujících součástí, např. nástroj, vřeteno
 - setrvačné síly, které vznikají vratným rotačním nebo přímočarým pohybem součástí
 - nepřesnosti převodových mechanismů obráběcího stroje
 - rotace nesymetrických hřídelí (např. s drážkou)
 - řezný proces:
 - přerušovaný řez (např. soustružení hřídele s drážkou)
 - kolísání hloubky řezu (např. soustružení mnohohranu)
 - nesouvislé řezné procesy (např. hoblování a obrážení)
 - nestabilita nárůstků
 - obrábění vlnitého povrchu
 - změna součinitele tření způsobená změnou rychlosti pohybu
 - charakter práce nástroje – např. frézování, kdy jednotlivé zuby frézovací hlavy jsou periodicky zatěžovány v řezu
 - kmitání přenášené na obráběcí stroj z okolí
- elektromagnetické zdroje: způsobeny magnetostrickými neboli změnou rozměru materiálu při zmagnetování
- ventilační zdroje: způsobené rotujícími lopatkami ventilátoru a následným prouděním vzduchu

3.1.3 Samobuzené kmitání

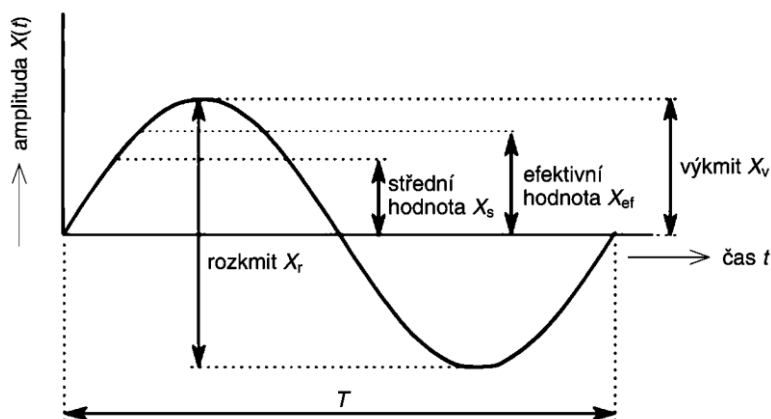
Samobuzené kmitání je vyvoláno prvním impulzem, bez periodické vnější síly. Po vychýlení soustavy z rovnovážné polohy impulzem probíhá kmitání bez přívodu energie z vnějšku. Průběh a vlastnosti kmitání závisí pouze na vlastnostech kmitající soustavy. Vyvolat samobuzené kmitání mohou například tyto vlivy [16]:

- nesouvisející s řezným procesem
 - relaxační kmitání tj. trhavé pohyby při velmi malých posuvech
 - kmitání kopírovacího systému se zpětnou vazbou
- související s řezným procesem
 - reprodukce předchozí vlnitosti povrchu
 - postupné usmýkávání článků nebo prvků třísky
 - nestabilita nárůstu
 - změna součinitele tření v závislosti na rychlosti pohybu

3.2 Měření vibrací

Každý stroj je za provozu doprovázen vibracemi, které jej charakterizují a podávají informace o vnitřních vazbách a stavech stroje a jednotlivých dílů. Díky propracovanosti vibrační diagnostiky lze získávat informace o místě a příčině poruch s vysokou přesností. [7]

Obecně se kmitání dělí na periodické, neperiodické a náhodné. Základním typem periodického kmitání je harmonické kmitání, obsahující jedinou frekvenci (obr. 6).



Obr. 6 Základní charakteristiky harmonického signálu [7]

Harmonické kmitání je popsáno rovnicí

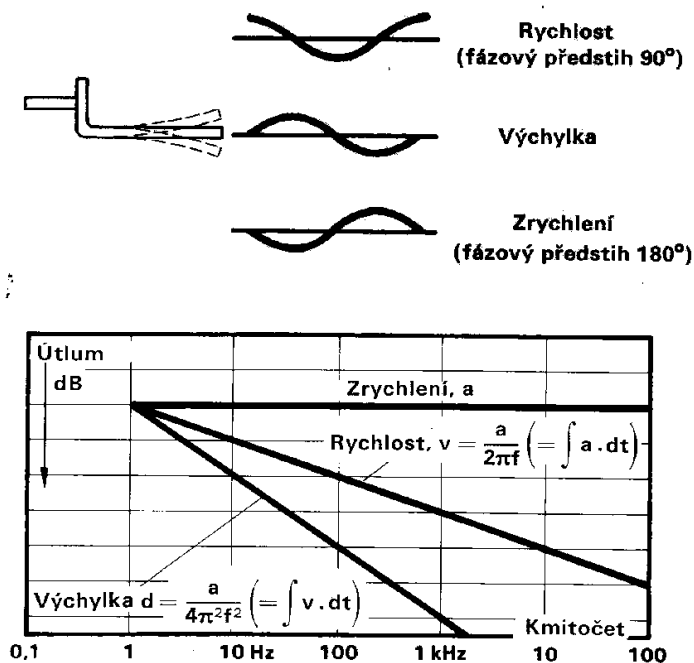
$$x(t) = x_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.11)$$

kde x_0 je amplituda, ω úhlová rychlost a φ fázový posuv kmitání. Základními charakteristikami popisujícími kmitavý pohyb jsou:

- Amplituda x_0 – též špička, maximální hodnota kmitavého pohybu
- Perioda T [s] – nejkratší doba, po níž se kmitavý děj pravidelně opakuje
- Frekvence f [Hz] – převrácená hodnota periody

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.12)$$

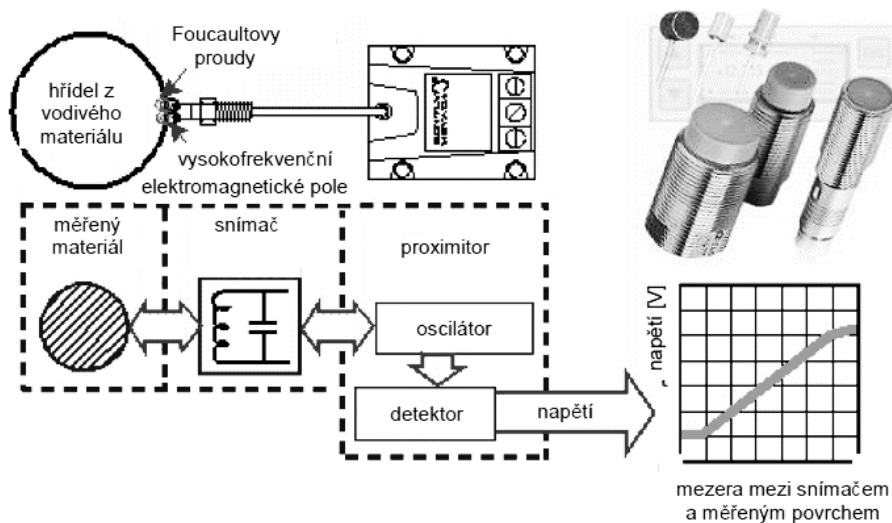
Existují tři typy snímačů pro měření vibrací, pomocí nichž můžeme měřit buď výchylku, rychlost nebo zrychlení vibrací. Tyto veličiny popisující kmitání mohou být vzájemně převáděny pomocí derivace nebo integrace podle času. Stačí tedy měřit pouze jednu z veličin a zbylé dvě získáme výpočtem. [21] Vztahy mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením vibrací jsou názorně zobrazeny na obrázku 7.



Obr. 7 Vztahy mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením vibrací [22]

3.2.1 Snímače výchylky

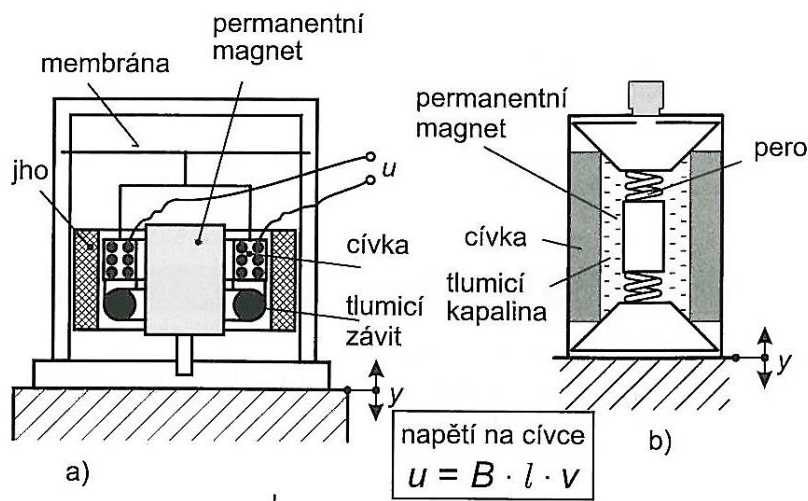
Snímače výchylky mohou být konstruovány na indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém nebo optickém principu. V současné době jsou nejvíce používány indukčnostní snímače, pracující na principu měnění se indukčnosti cívky v závislosti na hustotě vířivých proudů (obr. 8). Jejich nevýhodou je vysoká citlivost na parazitní jevy (např. délka kabelu, vnější elektromagnetické pole). Problémy s nejistotami měření mají i v poslední době často používané optické snímače výchylky. [20]



Obr. 8 Princip snímačů výchylky [20]

3.2.2 Snímače rychlosti (velometry)

Snímače rychlosti jsou konstruovány tak, že při vibracích sledovaného stroje se cívka kmitavě pohybuje v permanentním magnetickém poli, čímž se v cívkě indukují elektromotorická síla úměrná rychlosti vibrací (obr. 9). Nevýhodou těchto snímačů je velké množství mechanických částí, což je také důvodem, proč jsou dnes používány jen zřídka. [20]



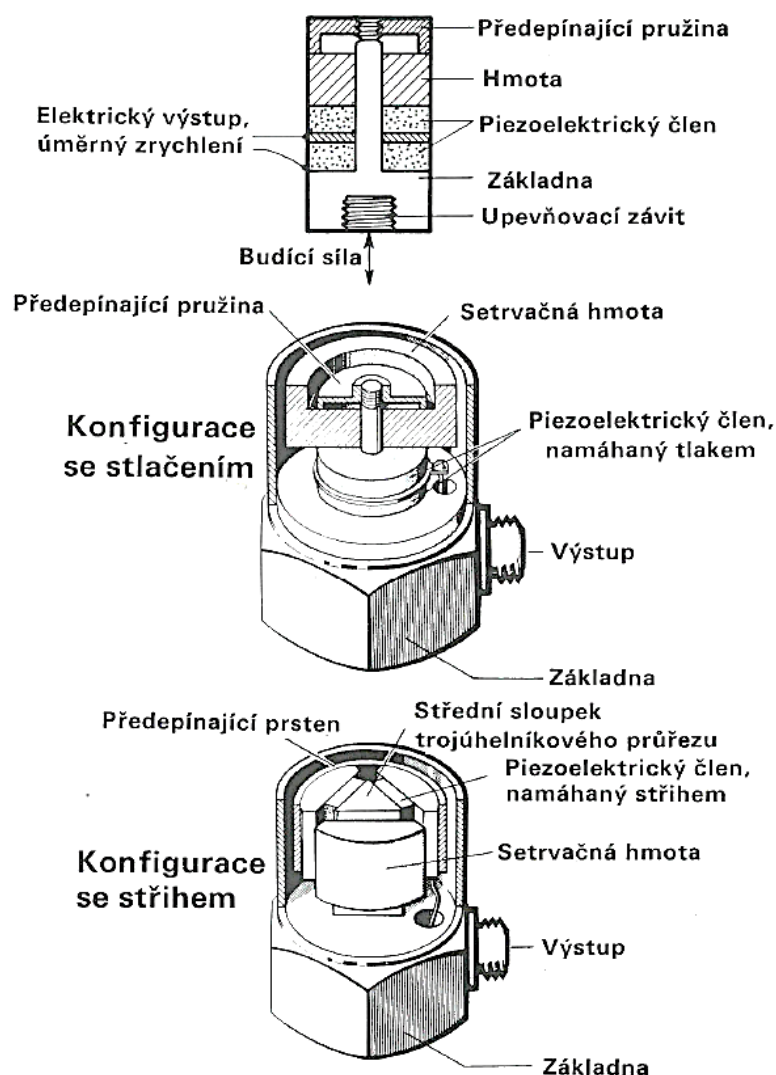
Obr. 9 Způsoby konstrukce snímačů rychlosti [20]

3.2.3 Snímače zrychlení (akcelerometry)

V dnešní době jsou nejpoužívanějším typem snímačů zrychlení piezoelektrické akcelerometry, ale existují i jiné typy, například kapacitní, tenzometrické nebo elektrodynamické akcelerometry. Základem piezoelektrického akcelerometru je tlakově, tahově či smykově namáhaný piezoelektrický krystal nebo uměle polarizovaná piezoelektrická hmota. Na ni je pružně připevněna přídatná hmota, která při kmitavém pohybu snímače působí silou na piezoelektrický krystal, čímž na něm vzniká elektrický náboj (obr. 10). Velikost elektrického náboje je přímo úměrná velikosti působící síly, která je dle Newtonova zákona rovna součinu hmotnosti a zrychlení.

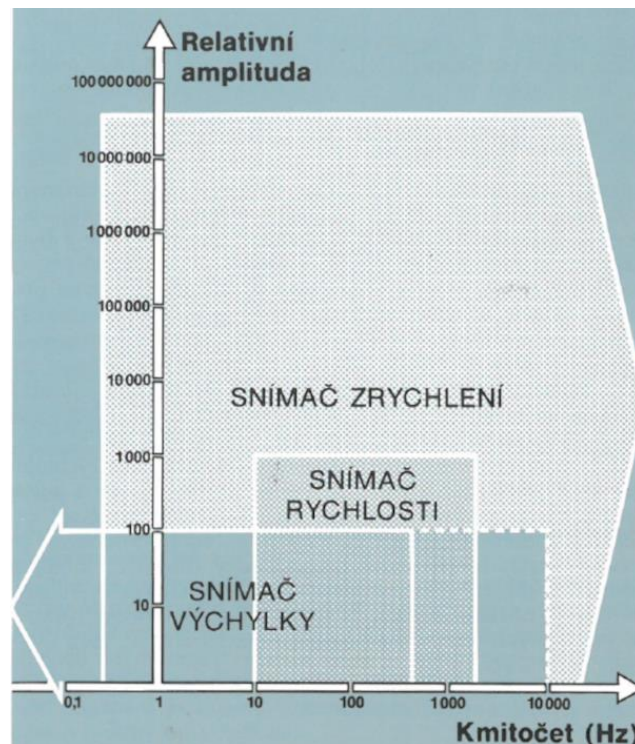
$$F = m \cdot a \quad (3.13)$$

Zrychlení působící na snímač je tedy úměrné výstupnímu elektrickému signálu. [22]



Obr. 10 Konstrukce piezoelektrických akcelerometrů [22]

Piezoelektrické akcelerometry jsou v dnešní době zdaleka nejpoužívanějšími snímači vibrací. V porovnání se snímači výchylky a rychlosti vibrací jsou všeobecně odolné a dlouhodobě provozně spolehlivé (nemají žádné pohyblivé části). Navíc mají mnohem menší rozměry, hmotnost a především se vyznačují širokým frekvenčním rozsahem od desetin do desítek tisíc Hz. Snímače rychlosti jsou limitovány horní mezní frekvencí kolem 1000Hz, což je pro monitorování většiny strojních zařízení nedostatečné. Snímače výchylky mají sice široký frekvenční rozsah až do 10kHz, ale zdůrazňují vliv složek s nízkými kmitočty, což limituje jejich uplatnění. Jsou používány v případech, kdy je nutno brát v úvahu malé vůle a tolerance strojních dílů a součástí. [22],[23] Porovnání frekvenčních rozsahů senzorů vibrací je zobrazeno na obrázku 11.



Obr. 11 Frekvenční měřicí rozsah senzorů vibrací [23]

3.2.4 Způsoby upevnění akcelerometru k měřenému objektu

Správnost upevnění akcelerometrů významně ovlivňuje přesnost samotného měření. Při nesprávném upevnění dochází ke snížení rezonanční frekvence upevněného snímače a tím k zúžení použitelného pracovního frekvenčního rozsahu. Způsobů upevnění existuje několik, jeho volba závisí na požadovaném frekvenčním rozsahu měření a na okolnostech měření – zda jde o trvalé/dočasné upevnění akcelerometru, přístupnost měřicího místa, zda je možné do měřeného objektu vyvrtat otvory se závity atd. Nejčastěji používané způsoby upevnění jsou následující: [22]

- Speciálním šroubem – nejširší použitelný frekvenční rozsah, rezonanční frekvence snímače kolem 31kHz
- Včelím voskem - rezonanční frekvence snímače kolem 29kHz, omezení pouze do 40°C z důvodu měknutí vosku při vyšších teplotách
- Lepidlem - rezonanční frekvence snímače kolem 28kHz, používána jsou speciální lepidla na bázi epoxidové pryskyřice nebo kyanoakrylátů
- Permanentním magnetem – značné snížení rezonanční frekvence snímače na 7kHz, výhodou snadné a rychlé upevnění
- Ruční sonda - snížení rezonanční frekvence snímače na 2kHz, vhodná pouze pro orientační a zkušební měření, kdy je třeba rychle měnit polohu snímače

3.3 Zpracování signálu vibrací

Při analýze signálu vibrací využíváme kritérií v časové nebo frekvenční oblasti. V časové oblasti sledujeme závislost amplitudy vibrací v čase, určujeme statistické parametry, čímž získáváme prvotní obecné informace o stavu zkoumaného stroje. Výhodou je snadná použitelnost statistických kritérií, získání rychlého a jednoduchého přehledu o stavu stroje. Nevýhodou je obecnost získaných informací, ve většině případů nelze určit konkrétně, o jakou závadu se jedná. Pro hlubší analýzu se používá analýza signálu ve frekvenční oblasti, čímž můžeme získat informace o typu, lokaci a závažnosti závady. [21]

Možných hodnotících kritérií získávaných v časové i frekvenční oblasti existuje velmi mnoho a cílem této práce není jejich výčet. Proto jsou v následujících kapitolách vybrána a popsána pouze nejpoužívanější kritéria. Uvedené vztahy jsou uvedeny obecně pro proměnnou x , kterou může být v praxi výchylka, rychlost nebo zrychlení vibrací.

3.3.1 Analýza v časové oblasti

Střední hodnota \bar{x} – případě spojitého signálu se vypočte integrací, u diskrétního signálu sumou, dle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \qquad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i(t)| \qquad (3.14)$$

Efektivní hodnota x_{ef} – též RMS (z angl. Root Mean Square), představuje celkový energetický obsah signálu, dává prvotní přehled o významnosti a množství naměřených vibrací, vypočte se dle vztahu:

$$x_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} \qquad x_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2(t)} \qquad (3.15)$$

Výkmit (též peak, špička) x_v - popisuje přítomnost krátkodobých jevů, např. mechanických rázů

Rozkmit (též peak-peak, špička-špička) x_r – bývá používán jako kritérium především v případech, kdy je důležitá výchylka vibrací, například z důvodu maximálního přípustného mechanického namáhání nebo konstrukčních vůlí

Crest factor – podíl maximální a efektivní hodnoty, bývá používán jako jeden z prvních indikátorů vznikající vady, protože již v jejím raném stádiu poměrně prudce roste jeho hodnota. Naopak v pozdějším stádiu poškození jeho hodnota klesá zpět k normálu, a proto se používá spíše jako doplněk k jiným kritériím.

$$CF = \frac{x_v}{x_{ef}} \qquad (3.16)$$

Koeficient špičatosti (angl. Kurtosis) – používá se pro sledování stavu ložisek. Předpokládá se, že vibrace vyvolané chodem nepoškozeného ložiska mají normální

(Gaussovo) rozdělení. Kritérium Kurtosis popisuje špičatost tohoto rozdělení. Zvyšující se poškození ložiska doprovází větší množství špiček v signálu, což způsobí, že signál už nemá normální rozdělení a koeficient špičatosti roste z běžné hodnoty $Kt=3$ až k hodnotám $Kt=13$. [24]

$$Kt = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x(n) - \bar{x})^4}{\left[\left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=0}^{N-1} (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2}$$

Všechny tyto parametry mohou být sledovány jak v celém frekvenčním rozsahu, tak ve zvoleném frekvenčním pásmu, získaném filtrací pomocí pásmové propusti (např. 0,5-1kHz).

3.3.2 Analýza ve frekvenční oblasti

Frekvenční analýza je založena na převodu signálu z časové do frekvenční oblasti. K tomu se využívá zpravidla tzv. Rychlá Fourierova transformace (zkráceně FFT z anglického výrazu Fast Fourier Transform). Její základ položil Joseph Fourier na přelomu 18. a 19. stol. na principu vyjádření analyzovaného signálu pomocí harmonických funkcí sinus a cosinus, obecně vyjádřených jako komplexní exponenciála. Pro spojitý signál $x(t)$ je definována dle vztahu

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (3.17)$$

kde $x(t)$ je spojitý signál, f značí frekvenci a j je imaginární jednotka. Pomocí inverzní (zpětné) Fourierovy transformace lze signál převést zpět do časové oblasti. Pro zpětnou transformaci spojitého signálu platí vztah

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi f t} df \quad (3.18)$$

Výpočet transformace spojitého signálu je matematicky obtížný a je třeba znát funkci $x(t)$. V technické praxi navíc zpravidla pracujeme s diskretními signály. Proto byla v 60. letech 20. stol. vyvinuta tzv. Diskrétní Fourierova transformace (DFT) definovaná pomocí vztahu

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (3.19)$$

Kde N je počet vzorků signálu a k nabývá hodnot $k = 0, 1, \dots, N-1$. Pro zpětnou DFT platí vztah

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (3.20)$$

Kde n nabývá hodnot $n = 0, 1, \dots, N-1$.

Rychlá Fourierova transformace je pouze speciálním případem DFT a spočívá ve volbě zvláštní délky záznamu $N=2^m$, kde m je přirozené číslo. Příkladem délky záznamu může být $N=256, 512, 1024, 2048$ atd. Je nutné nastavit frekvenční rozsah a dělení výsledného spektra, časovou váhovou funkci a průměrování. [22]

Parametry nastavení FFT:

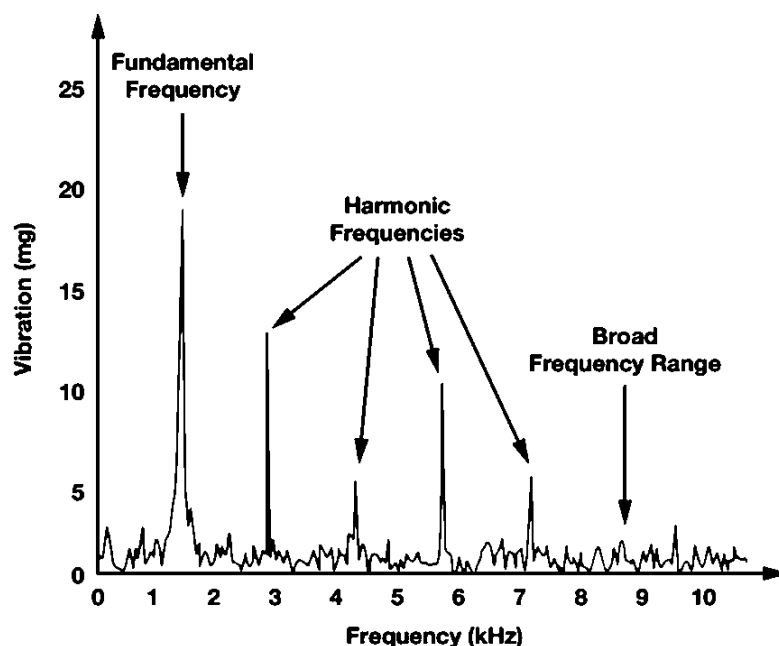
- frekvenční rozsah, což je základní pásmo od 0 Hz do $f_{vz}/2$, které je nezávislé na počtu vzorků N (skutečný rozsah je v praxi menší vlivem filtrů),
- „zoom“ faktor, který při použití frekvenční lupy udává, kolikrát je frekvenční rozsah menší,
- počet spektrálních čar je obvykle $N/2$, kde N je počet vzorků signálu (neplatí pro tzv. nedestruktivní zoom),
- rozlišitelnost frekvenční analýzy, udávající rozestup mezi spektrálními čarami r , je daný vztahem

$$r = \frac{1}{T} = \frac{f_{vz}}{N} \quad (3.21)$$

Ze vztahu vyplývá, že chceme-li menší rozestup mezi frekvenčními čarami, je zapotřebí vyšší počet vzorků N , tedy delší doba měření i následné analýzy signálu.

- Šíře pásma je kromě pravoúhlého okna obecně širší než rozlišitelnost a to dle volby okna. [7]

Při převodu diskretního signálu do frekvenční oblasti je třeba dbát na správné nastavení, jinak může vést analýza k chybným výsledkům. Zejména jde o aliasing, který vzniká při nesprávném vzorkování signálu a nedodržení Nyquistova teorému, nebo o chybu únikem, které se zamezuje použitím váhových oken. Správně provedenou FFT získáme frekvenční spektrum vyjadřující zastoupení jednotlivých frekvencí v analyzovaném signálu. Příklad tohoto spektra je zobrazen na obr. 12.



Obr. 12 Frekvenční spektrum signálu vibrací [25]

Z frekvenčního spektra můžeme snadno zjistit vývoj hodnot vibrací na jednotlivých frekvencích. Každá část stroje se zpravidla projevuje na jiné frekvenci dané její geometrií, uložením atd. Například rotující součásti se projevují na otáčkové frekvenci a jejích násobcích, ozubené převody na zubovou frekvenci, ložiska a kuličkové šrouby mají své specifické frekvence dané svými rozměry a počtem valivých elementů.

Významné frekvence vyskytující se v signálu vibrací obráběcích strojů jsou[21]:

Otáčková frekvence a její násobky

Je způsobena všemi rotujícími součástmi, jako jsou hřídele, ozubená kola, rotory elektromotorů, vřetena atd. Každá rotující součást má většinou svojí vlastní otáčkovou frekvenci danou rychlostí otáčení. Zvýšená amplituda vibrací na otáčkové frekvenci může značit nevývahu, ohyb hřídele nebo uvolnění mechanických vazeb. Výpočet otáčkové frekvence je zobrazen v rovnici 3.22, kde jedinou proměnnou n jsou otáčky součásti za minutu.

$$f_o = \frac{n}{60} \quad (3.22)$$

Zubová frekvence

Jsou vyvolány ozubenými převody a převodovkami. Zubová frekvence je dána rychlostí otáčení ozubeného kola a počtem jeho zubů (rovnice 3.23).

$$f_z = \frac{n}{60} \cdot z \quad (3.23)$$

Frekvence způsobené samotným obráběcím procesem

Jsou určeny charakterem práce nástroje, případně vlastnostmi samotného nástroje. Významným zdrojem vibrací je například obrábění s přerušovaným řezem či s kolísavou hloubkou záběru. Jiným příkladem může být vrtání a frézování – v tomto případě je frekvence určena počtem zubů nástroje.

Frekvence ložisek

Jsou dány geometrií ložiska, konkrétní vztahy pro jejich výpočet jsou uvedeny v následujícím odstavci věnovaném obáلكové metodě.

Envelope – Obáلكová analýza

Obáلكová analýza se používá především při analýze stavu valivých ložisek. Při výskytu poruchy dráhy nebo kuličky vznikají rázy, které se vyznačují vyšší frekvencí (5-20kHz), ale jejichž malá amplituda je těžko detekovatelná některým z předchozích způsobů. Pomocí filtru (pásmové propusti) jsou odfiltrovány všechny ostatní frekvence a je odstraněn šum. Usměrněním a použitím obáلكového detektoru se signál připraví pro zpracování pomocí FFT. Pomocí transformace zjistíme hledanou frekvenci opakujících se pulzů. Každá část ložiska, tedy vnější a vnitřní kroužek, valivé elementy (kuličky nebo válečky) a klec, se projevují na jiné frekvenci. Na základě následujících vztahů můžeme určit, které části zjištěná frekvence odpovídá.

$$\text{Vnější kroužek} \quad BPFO = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \quad (3.24)$$

$$\text{Vnitřní kroužek} \quad BPFI = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \quad (3.25)$$

$$\text{Valivé elementy} \quad BSF = \frac{P_d}{2B_d} f_r \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right)^2 \right) \quad (3.26)$$

$$\text{Klec} \quad FTF = \frac{1}{2} f_r \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \quad (3.27)$$

kde f_r je frekvence daná otáčkami vnitřního a vnějšího kroužku, B_d je průměr valivého elementu, P_d je roztečný průměr, β je úhel dotyku a n je počet kuliček nebo válečků.

4 Analýza řešeného problému

4.1 Problémová situace:

V současné době se ve strojírenství stále více uplatňuje automatizace výrobních procesů, která se vyznačuje používáním samočinných řídicích systémů s co nejmenším podílem lidské práce na výrobním procesu. Spolu s tím přichází také nutnost online monitorování a včasného diagnostikování výrobních (např. obráběcích) strojů. Ve výzkumném a vývojovém centru INTEMAC, ve kterém pracuji, řešení tohoto problému neexistovalo, a proto bylo rozhodnuto o jeho řešení.

4.2 Formulace problému:

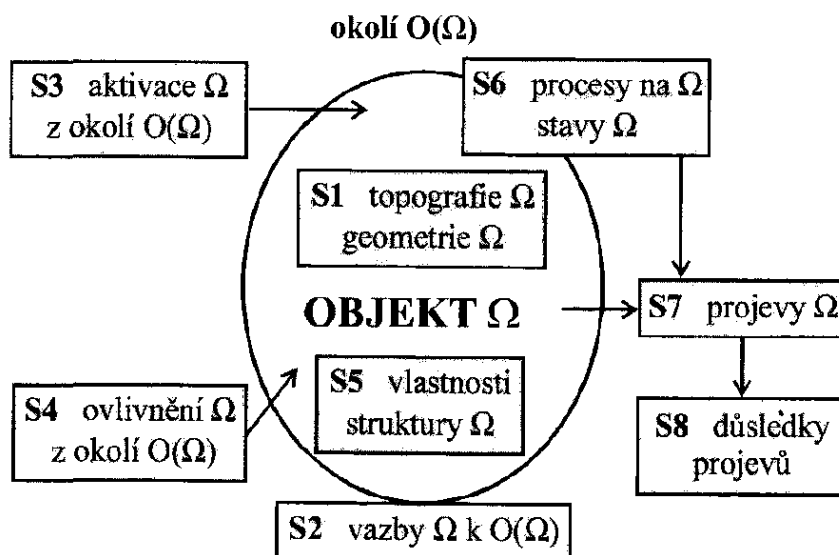
Absence řešení pro online monitorování a diagnostikování obráběcího procesu.

4.3 Cíle řešeného problému:

- Návrh vhodné senzoriky a HW.
- Umístění senzorů na obráběcí stroj.
- Tvorba softwarového rozhraní.
- Experimentální ověření funkčnosti platformy.
- Závěry.

4.4 Systém podstatných veličin

V systémové metodologii má systém podstatných veličin $\Sigma(\Omega)$ svou strukturu prvků veličin podstatných pro řešení problému a vazeb mezi nimi. [26]. Formálně systém podstatných veličin obsahuje devět podmnožin označovaných S_0 – S_8 . Struktura systému podstatných veličin $\Sigma(\Omega)$ je na obr. 13.



Obr. 13 Struktura systému podstatných veličin [26]

- Ω – objekt
Objektem Ω je soustava stroj-nástroj-obrobek

- **Podmnožina S0** – okolí objektu
Okolím objektu je vnější vzdušné prostředí obklopující stroj a povrch, na kterém je obráběcí stroj postaven. Do okolí objektu patří i případné další entity (např. jiné obráběcí stroje, dopravníky, jeřáby) vyskytující se v okolí objektu.
- **Podmnožina S1** – geometrie a topologie objektu
Geometrie objektu je dána konstrukčním návrhem stroje, způsobem upevnění obrobku a použitým obráběcím nástrojem.
- **Podmnožina S2** – podstatné vazby objektu na okolí
Objekt je spojen s povrchem pomocí patek.
- **Podmnožina S3** – aktivace objektu z okolí
Objekt je aktivován pomocí elektrické energie dodávané ze sítě. Vyjádřena je následujícími veličinami: počet fází, frekvence, napětí a proud zdroje.
- **Podmnožina S4** – ovlivňování procesů z okolí
Objekt je ovlivňován atmosférickými podmínkami, především teplotou a vlhkostí. Dále je ovlivňován vibracemi od okolních pohyblivých objektů.
- **Podmnožina S5** – vlastnosti prvků struktury objektu
Do této podmnožiny patří veličiny popisující geometrii jednotlivých prvků objektu a vlastnosti použitých materiálů. Podstatnými veličinami jsou rozměry, tvrdost a pevnost obrobku a nástroje, v případě vrtání či frézování je to průměr nástroje a počet břitů použitého materiálu. Dále potom tuhost, teplotní vodivost a vlastní frekvence jednotlivých prvků objektu a vazeb mezi nimi.
- **Podmnožina S6** – procesy a stavy na objektu
Deformačním působením rezného nástroje na obrobek dochází k odebírání materiálu obrobku ve formě třísek, což způsobuje silové a teplotní působení šířící se v soustavě stroj-nástroj-obrobek. Jejich projevem jsou vibrace, hluk, změny teploty, vznik napětí.
- **Podmnožina S7** – projevy (chování) objektu
Mezi projevy chování objektu jsou počet a kvalita výrobků, abrazivní opotřebení pohyblivých součástí stroje a břitů nástroje.
- **Podmnožina S8** – důsledky projevů objektu
Na základě počtu a kvality výrobků je dána spokojenost pracovníků výrobní firmy a jejich zákazníků. Důsledkem opotřebení objektu je jeho porucha způsobující nefunkční stav. To představuje mezní stav.

4.5 Výběr metody řešení

Z důvodu komplexnosti problému a omezeného rozsahu diplomové práce, nelze vytvořit univerzální diagnostický systém pro všechny druhy obrábění (soustružení, frézování, vrtání, řezání, atd.). Řešení problému bude provedeno pro vertikální obráběcí centrum, a to pomocí metod technické diagnostiky aplikovaných v samostatné diagnostické jednotce. Na základě rešerše možností údržby a diagnostiky v kapitolách 2 a 3 bylo rozhodnuto, že základem navrženého systému bude vibrodiagnostika, doplněná o sledování teplot ve vybraných místech, točivého momentu a otáčet vřetena.

Pro online monitorování obráběcího procesu pomocí dat ze senzoru v kombinaci s komunikací s řídicím systémem obráběcího stroje je vhodné použití PLC komunikujícího s řídicím systémem obráběcího stroje a vstupních modulů napojených na senzory vibrací a teploty. Pro řízení PLC bude vytvořen algoritmus zpracovávající a vyhodnocující data ze senzorů. Funkčnost navrženého řešení bude ověřena experimentálním obráběním.

5 Návrh platformy pro monitorování obráběcího procesu

Pro dodání hardwaru a softwarového rozhraní pro tvorbu řídicího algoritmu byla vybrána firma B+R Automatizace s.r.o. Důvodem výběru byly předchozí zkušenosti se softwarem, jehož licence byla již dříve zakoupena a pro jehož používání byli příslušní zaměstnanci proškoleni. Zároveň jde o ověřeného a spolehlivého dodavatele, jehož hardware i software je v současnosti využíván na jiných projektech výzkumného a vývojového centra INTEMAC a je případně plně kompatibilní pro případné doplnění a pro vzájemnou komunikaci mezi testovacími zařízeními, která může být použita pro sběr relevantních dat.

5.1 Výběr hardwarového vybavení

Na základě přechodí řešerše způsobů diagnostiky obráběcích strojů bylo rozhodnuto, že základem bude vibrodiagnostika doplněná o termodiagnostiku a sledování příkonu pohonných jednotek. Množství snímačů, karet pro zpracování signálu, typ PLC, zdroje atd. bylo zvoleno pro monitoring vertikálního obráběcího centra Tajmac-ZPS MCFV 1680 (obr. 14). Vytvořený algoritmus monitorující obráběcí stroj byl vytvořen na principech, uplatnitelných i u jiných typů a velikostí obráběcích strojů. Konkrétní řešení pro jiný stroj by se lišilo množstvím a umístěním snímačů a nastavením tzv. tresholdů – tedy mezních hodnot přípustných parametrů pro provoz stroje.

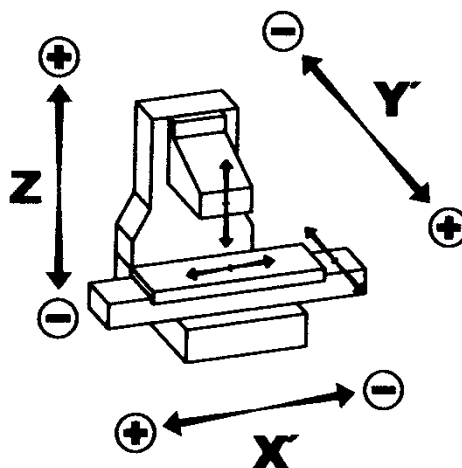


Obr. 14 Vertikální obráběcí centrum Tajmac-ZPS MCFV 1680 [27]

Vertikální obráběcí centrum MCFV 1680 je komplexní stroj pro třískové obrábění. Obrobek se upíná na horní plochu pracovního stolu, který se pohybuje po vedení na křížovém suportu ve směru osy X (obr. 15). Křížový suport se pohybuje na základně v příčném směru (osa Y) a vřeteník po vedení stojanu ve vertikálním směru (osa Z). Pohyb ve všech osách je zajištěn kuličkovými šrouby a veden pomocí lineárních

vedení s valivými elementy. S tím souvisí i množství použitých pohonů, ložisek a převodů. Dále je stroj vybaven systémem dopravníků třísek, centrálním mazacím systémem a zásobníkem nástrojů. [27]

Z popisu stroje a jeho komplexnosti je zřejmé, že diagnostický systém celého obráběcího stroje by představoval práci na několik let a mnohonásobně by překročil rozsah diplomové práce. Proto bude vytvořen systém pouze pro diagnostiku samotného obráběcího procesu.



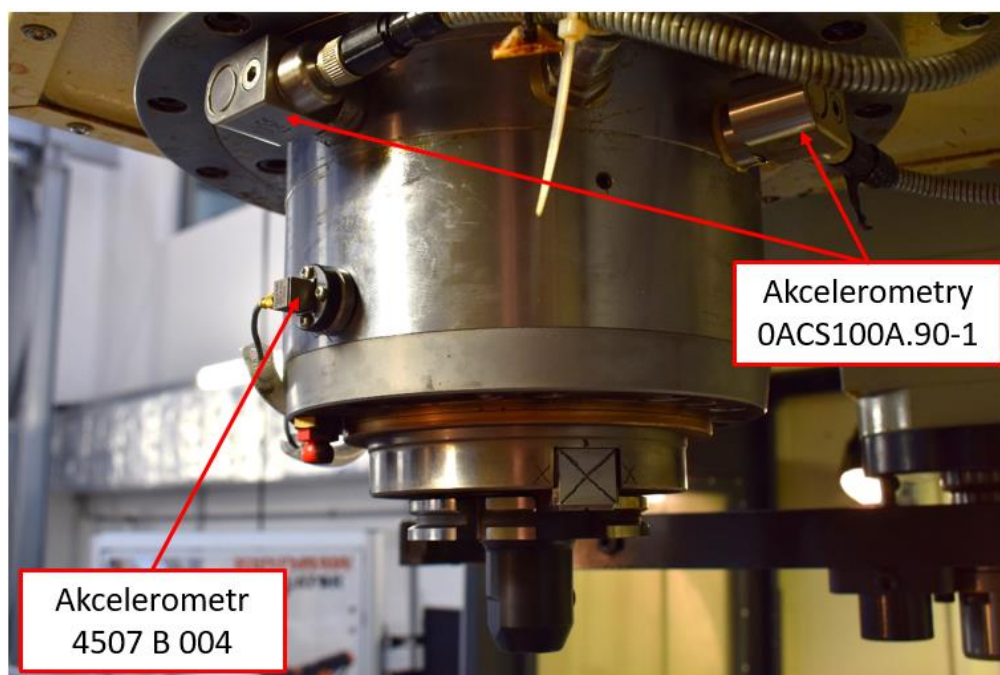
Obr. 15 Pohyb stroje v osách X, Y a Z

Pro měření vibrací byly vybrány akcelerometry 0ACS100A.90-1, jehož základní vlastnosti jsou zobrazeny v tabulce 1.

| | |
|-------------------|--|
| Citlivost | 100mV/g (u konkrétního kusu se liší v rozsahu $\pm 10\%$) |
| Frekvenční rozsah | 2Hz až 10kHz s přesností $\pm 5\%$ |
| Rozsah měření | $\pm 50g$ |
| Přípustná teplota | -55°C až $+140^{\circ}\text{C}$ |
| Hmotnost snímače | 170g |

Tab. 1 Základní vlastnosti akcelerometru 0ACS100A.90-1

Na vřeteník obráběcího stroje byly umístěny 3 akcelerometry 0ACS100A.90-1, dva ve směru os x a y ve spodní části vřeteníku (obr. 16), třetí byl umístěn v horní části vřeteníku ve směru osy x (obr. 17). Upevnění snímačů bylo provedeno pomocí epoxidového lepidla. Protože s měřením vibrací pomocí PLC a těchto akcelerometrů nebyly ve výzkumném centru INTEMAC předchozí zkušenosti, bylo rozhodnuto o provedení validace dat. Pro tento účel byla použita aparatura pro měření vibrací od firmy Brüel & Kjær, pomocí níž byly snímány data vibrací ve stejných místech, jako pomocí PLC. Bylo provedeno testovací frézování, při němž bylo zjištěno, že hodnoty vibrací získaných pomocí PLC a pomocí aparatury Brüel & Kjær jsou shodné s menšími odchylkami max. 3%, a to jak v celkovém úhrnu RMS rychlosti vibrací, tak na otáčkové a zubové frekvenci nástroje.



Obr. 16 Umístění akcelero­metrů na vřeteník

Na obrázku 16 lze vidět i umístění jednoho z akcelero­metrů Brüel & Kjær 4507 B 004, pomocí kterých byla prováděna validace dat. Původním záměrem použití tohoto snímače bylo provedení validace hodnot RMS rychlosti vibrací ve frekvenčním rozsahu 10-1000Hz dle normy ČSN ISO 10816. Proto byly akcelero­metry připevněny pomocí silného permanentního magnetu, jak lze vidět na obrázku. Během přípravy měření však byla zjištěna nutnost provedení frekvenční analýzy v co nejširším frekvenčním rozsahu. Z tohoto důvodu byly akcelero­metry Brüel & Kjær odejmuty a znovu připevněny pomocí epoxidového lepidla.



Obr. 17 Umístění třetího akcelerometru v horní části vřeteníku

Pro měření teploty byly použity odporové snímače Lion P016-4050. Snímač je tvořen ocelovým měřicím pouzdrem, ve kterém je umístěno čidlo teploty a přívodním dvou vodičovým kabelem. Vlastnosti teplotního senzoru jsou zobrazeny v tabulce 2.

| | |
|-----------------|---|
| Třída přesnosti | B dle ČSN EN 60751 $\pm (0,3+0,005 t)$ ve °C |
| Měřicí rozsah | -50°C až +200°C |
| Způsob upevnění | Magnetem |

Tab. 2 základní vlastnosti teplotního snímače Lion P016-4050

Dva snímače teploty byly umístěny na vřeteník obráběcího stroje (obr. 18). Dostatečný kontakt a přenos tepla mezi vřeteníkem a snímačem byl zajištěn teplovodivou pastou.



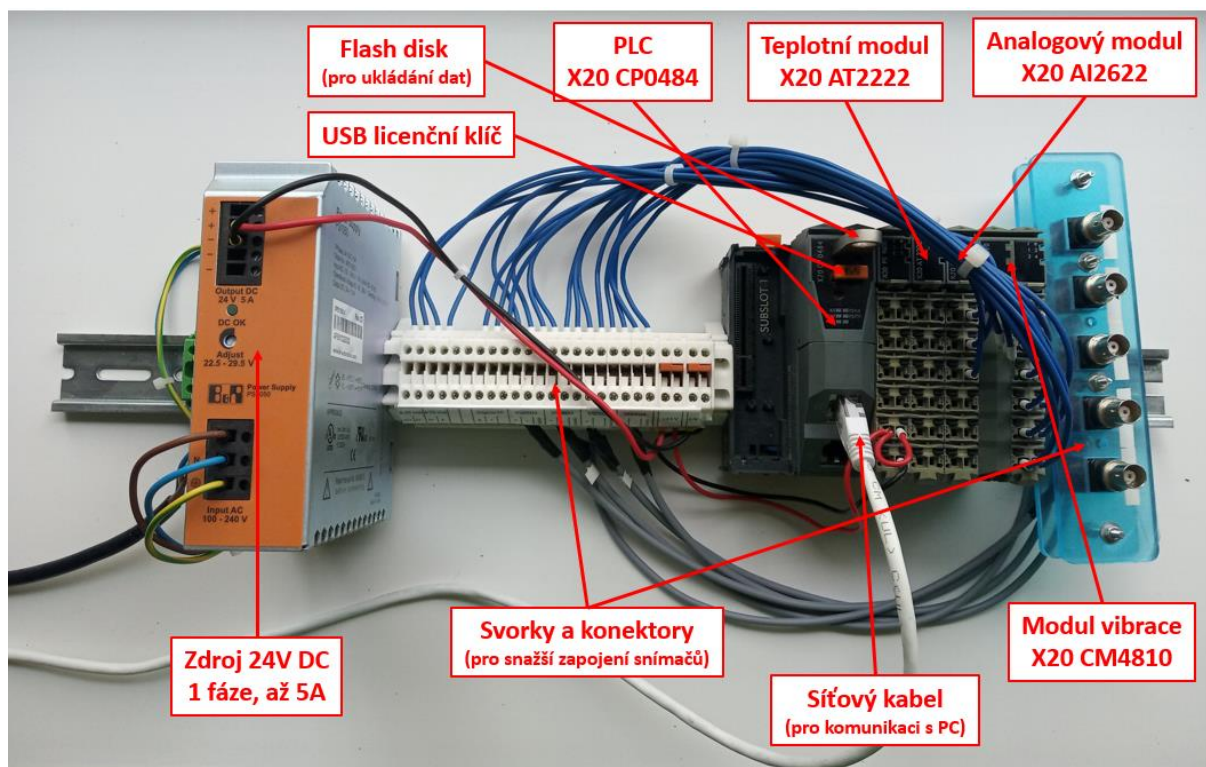
Obr. 18 Umístění snímačů teploty P016-4050

Pro zpracování signálu vibrací byl použit 4kanálový analogový vstupní modul X20CM4810. Modul je vybaven 24bitovým A/D převodníkem se vzorkovací frekvencí 51,562 kHz a obsahuje základní integrované algoritmy pro zpracování signálu vibrací, jako je například konfigurovatelný filtr horní a dolní propusti, výpočet Fourierovy transformace a generátor křivky obálky signálu. Frekvenční rozsah vyhodnocovaného signálu je 63mHz až 10kHz.

Modul X20AT2222 byl použit pro zpracování signálů ze snímačů teploty, obsahující 2 vstupy pro odporové měření teploty. Každý vstup je konfigurovatelný – pro dvou nebo třívodičové zapojení, pro zapojení PT100 i PT1000 snímače. Modul je vybaven vstupním filtrem typu dolní propust s mezní frekvencí 500Hz a 16bitovým A/D převodníkem.

Následující zapojený modul X20AI2622 je konfigurovatelný pro zapojení dvou analogových vstupů. Ty mohou mít formu proudového nebo napěťového signálu. Analogový vstupní signál je v modulu převeden na digitální (diskrétní) signál pomocí 13bitového A/D převodníku. Volitelně lze použít vstupní filtr typu dolní propust třetího řádu.

Základem systému pro monitoring obráběcího procesu byl zvolen kompaktní PLC X20CP0484. Jeho výhodou jsou kompaktní rozměry a odolná bezúdržbová konstrukce (bez baterií a větráku chlazení). Je vybaven procesorem ARM Cortex-A9 umožňující dosahující doby cyklu programu až 0,4ms. Kompletní specifikace všech modulů lze zobrazit na internetových stránkách firmy B&R Automation [28].

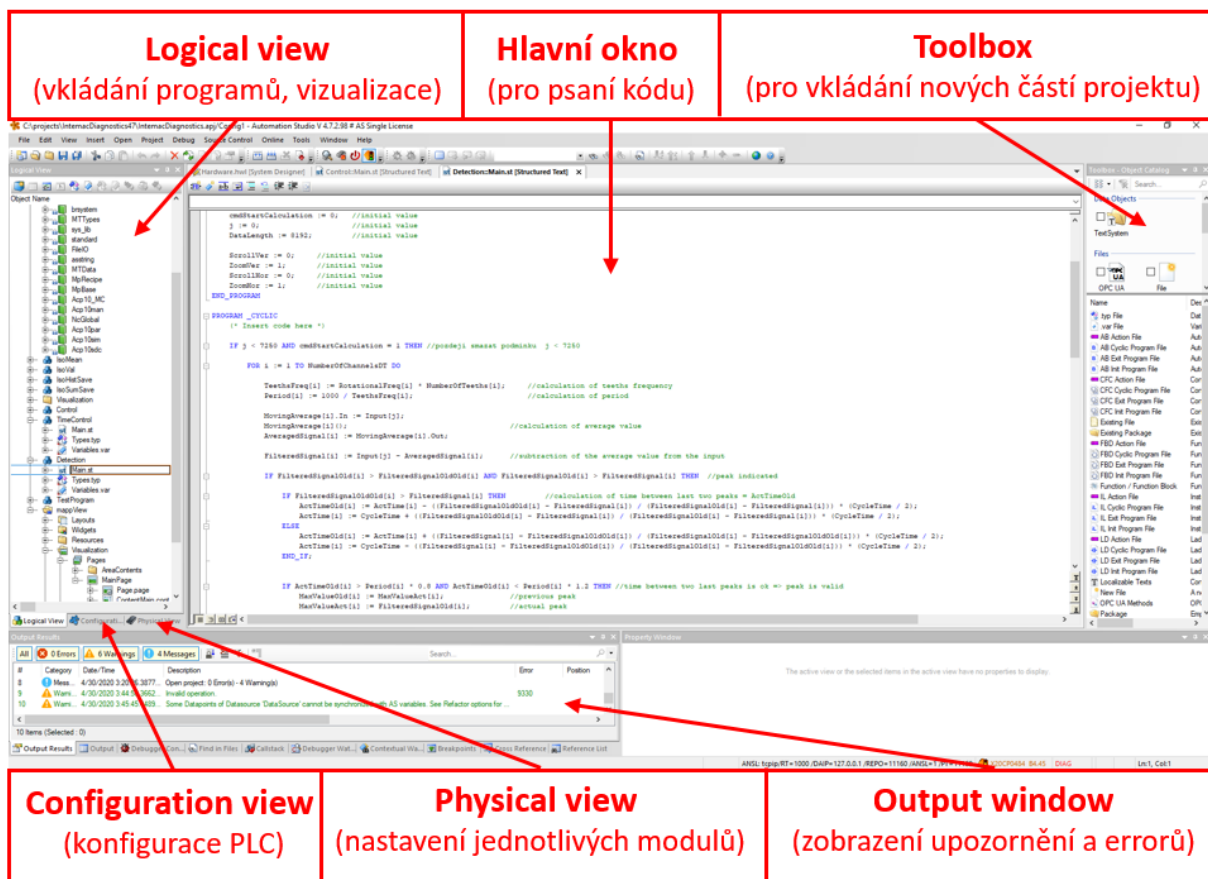


Obr. 19 Hardwarové řešení diagnostické jednotky

5.2 Tvorba softwarového řešení

Softwarové řešení pro diagnostiku bylo vytvořeno v programu Automation Studio 4.4. Projekt MCFV1680Diag je přílohou této práce a skládá se z těchto částí:

- Konfigurace karet vstupních signálů
- Programy:
 - IsoMean
 - IsoVal
 - IsoHistSave
 - IsoSumSave
 - Detection
 - Time Control
 - TempMon
- Vizualizace



Obr. 20 Ukázka prostředí programu Automation Studio 4.4

5.2.1 Konfigurace modulů vstupních signálů

Prvním krokem při zpracování signálů ze senzorů je konfigurace vstupních karet a přiřazení proměnných jednotlivým vstupním datům. Pomocí analogových vstupů $\pm 10V$ jsou získávána data aktuálního zatížení a otáček vřetena. Tyto získané hodnoty jsou datového typu INT (integer) a nabývají celočíselných hodnot v rozsahu -32767 až +32767. Pro zjištění hodnot v základních jednotkách soustavy SI je třeba provést přepočít, který je realizován v programu „Config“. Dále je vypočtena otáčková frekvence vřetena a zubová frekvence pro zadaný počet zubů nástroje, které jsou vstupem pro nastavení karty pro získání hodnot vibrací.

V modulu pro sledování vibrací byl nastaven výpočet RMS hodnot rychlosti vibrací, a to v celém frekvenčním spektru a ve vybraných frekvenčních pásmech – v okolí otáčkové a zubové frekvence nástroje. Na základě experimentálního obrábění (kap. 6) bylo vybráno i pásmo vyšších frekvencí v rozsahu 9-10kHz. Pro každý akcelerometr byla nastavena citlivost dle kalibračního listu.

Vstupní modul AT4222 byl nastaven pro příjem signálu z prvních dvou kanálů pomocí teplotních senzorů PT1000. Vstupní data jsou opět datového typu INT, proto jsou v programu „TempMon“ převedena na datový formát s plovoucí čárkou REAL a vydělena konstantou 10 pro získání dat teploty ve stupních Celsia. Tentýž přepočít je prováděn i pro teplotní signál z procesoru a chladiče PLC. Získané hodnoty teplot ze senzorů i z PLC jsou každých 5s ukládány v poli (vektoru) těchto hodnot pro zobrazení grafu průběhu teplot ve vizualizaci.

5.2.2 Tvorba programů a algoritmů

Pomocí algoritmu obsaženého v programu *DataLog* jsou ukládány získané hodnoty RMS rychlosti vibrací ve všech čtyřech sledovaných frekvenčních pásmech, kroutícího momentu a otáček včetně. Funkcí *DevLink* je vytvořeno propojení s flash diskem připojeným na USB port s označením IF5. Ukládané proměnné jsou definovány pomocí funkce *MpDataRegPar*, stejně jako jejich popis a jednotky. Časový odstup mezi uloženými hodnotami byl stanoven na 2ms. Samotné ukládání dat je prováděno funkcí *MpDataRecorder*. Z důvodu rychlosti a plynulosti ukládání, shromažďuje funkce hodnoty ve své vnitřní paměti a v časovém intervalu 2s je ukládá do textového souboru formátu CSV (z angl. Comma-separated values). Nastavení funkce *MpDataRecorder* je zobrazeno na obrázku 21.

| Name | Value | Unit |
|-------------------------|-------------------------------|------|
| gDataRecMeas | | |
| DataRecorder | | |
| Maximum number of files | 10 | |
| Maximum file size | 51200 | kB |
| Decimal digits | 6 | |
| Save interval | 2000 | ms |
| Buffer size | 1000 | kB |
| Power fail-safe | TRUE | |
| Filename pattern | Datalog_%Y_%m_%d_%H_%M_%S.csv | |
| Timestamp pattern | %Y %m %d %H:%M:%S.%L | |
| Column separator | : | |
| Decimal mark | . | |
| Save automatically | TRUE | |
| Overwrite oldest file | FALSE | |
| Save initial values | FALSE | |
| Format | CSV | |
| Alarms | MpAlarm | |

Obr. 21 Nastavení funkce *MpDataRecorder*

Ukládání těchto dat bylo zvoleno pro potřeby vyhodnocení dat z experimentálního obrábění (kapitola 6). Textový soubor formátu CSV lze importovat a zpracovat ve většině běžných programů pro zpracování dat – například Matlab, Excel (obr. 22). Vyhodnocením uložených dat z experimentu určíme správné nastavení systému diagnostiky (např. vhodnost použitých frekvenčních pásem a určení tresholdů pro sledovaná data). Po nastavení a odladění systému pro daný stroj by již nebylo potřebné tyto data ukládat.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O |
|----|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|--------------|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Timestamp | RMSx [mn] | RMSy [mn] | RMSz [mn] | RMSx otac | RMSy otac | RMSz otac | RMSx zubc | RMSy zubc | RMSz zubc | RMSx vyss | RMSy vyss | RMSz vyss | rychlost vrete | zatizení vrt |
| 5 | 2019 02 11 17:17:51:053 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 2001.037598 | 6.988739 |
| 6 | 2019 02 11 17:17:51:055 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 2001.037598 | 6.988739 |
| 7 | 2019 02 11 17:17:51:057 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 2001.037598 | 6.988739 |
| 8 | 2019 02 11 17:17:51:059 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 2001.037598 | 6.988739 |
| 9 | 2019 02 11 17:17:51:061 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 2001.037598 | 6.988739 |
| 10 | 2019 02 11 17:17:51:063 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 2001.037598 | 6.988739 |
| 11 | 2019 02 11 17:17:51:065 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 1999.084473 | 6.939909 |
| 12 | 2019 02 11 17:17:51:067 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 1999.084473 | 6.939909 |
| 13 | 2019 02 11 17:17:51:069 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 1999.084473 | 6.939909 |
| 14 | 2019 02 11 17:17:51:071 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 1999.084473 | 6.939909 |
| 15 | 2019 02 11 17:17:51:073 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 1999.084473 | 6.988739 |
| 16 | 2019 02 11 17:17:51:075 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 1999.084473 | 6.988739 |
| 17 | 2019 02 11 17:17:51:077 | 0.171568 | 0.046078 | 5.678927 | 0.014705 | 0.008823 | 0.030815 | 0.006862 | 0.006862 | 0.002982 | 0.138235 | 0.065686 | 5.735587 | 1999.084473 | 6.988739 |
| 18 | 2019 02 11 17:17:51:079 | 0.131372 | 0.044117 | 5.697814 | 0.013725 | 0.008823 | 0.049701 | 0.008823 | 0.006862 | 0.00497 | 0.129411 | 0.064705 | 5.695825 | 1999.084473 | 6.988739 |
| 19 | 2019 02 11 17:17:51:081 | 0.131372 | 0.044117 | 5.697814 | 0.013725 | 0.008823 | 0.049701 | 0.008823 | 0.006862 | 0.00497 | 0.129411 | 0.064705 | 5.695825 | 1999.084473 | 6.988739 |

Obr. 22 Uložené hodnoty pomocí funkce *MpDataRecorder*, zobrazeno v programu MS Excel 2013

Pomocí stejných funkcí je ukládán i časový průběh vibrací (program *DataLogRaw*), pouze s jiným časovým odstupem mezi hodnotami – ten je stanoven na minimální možnou hodnotu 0,4ms. Časový průběh vibrací je ukládán z důvodu zkoušení diagnostického systému na reálných datech. Pomocí programu *LoadData* lze totiž data opět načíst a testovat pomocí nich funkčnost vytvořených algoritmů. Je třeba počítat s tím, že maximální frekvence obsažená v takovém znovu načteném signálu je 1250Hz (dle Nyquistova teorému).

Načtení hodnot z textového souboru je založeno na principu načtení jeho části a vyhledání specifického znaku – oddělovače řádků. Poté lze pomocí oddělovačů sloupců najít přesnou pozici jednotlivých hodnot a tuto hodnotu převést na číselný datový typ. Na obrázku 23 je zobrazena ukázka z programu *LoadData*.

```
SearchedString := '$r$';
PositionEnt := FIND(LoadedString, SearchedString);
IF PositionEnt = 0 THEN
    RestString := MID(LoadedString, LEN(LoadedString) - PositionEntOld - 1, PositionEntOld + 2);
    LoadedString := CONCAT(RestString, NewString);
    PositionEnt := FIND(LoadedString, SearchedString);
    PositionEntOld := -1;
    cmdLoad := 1;
END_IF;

InputString := MID(LoadedString, PositionEnt - PositionEntOld - 2, PositionEntOld + 2);
InputReal := STRING_TO_REAL(InputString);

LoadedString := REPLACE(LoadedString, ';;', 2, PositionEnt);
PositionEntOld := PositionEnt;
```

Obr. 23 Část programu *LoadData*

Pro sledování trendu je vhodné získané hodnoty RMS rychlosti vibrací průměrovat. Tím se eliminuje vliv náhlých výkyvů, rázů atd. Průměrování je prováděno v programu *IsoMean*. Průměruje se vždy 1000 hodnot vzorkovaných frekvencí 500Hz, tedy časový úsek trvající 2s.

Základem online monitoringu obráběcích strojů pomocí vibrací je sledování vybraných hodnot a určení tzv. tresholdů (prahových hodnot). Jejich překročení značí možnou poruchu, opotřebení a potřebu údržby. Jsou tedy mezními hodnotami mezi třemi v praxi používanými úrovněmi stavu stroje:

| | |
|---------------------------|---|
| Dobrý stav (zelená barva) | Je možný neomezený dlouhodobý provoz |
| Varování (oranžová) | Pouze omezený provoz do provedení údržby/opravy |
| Alarm (červená) | Nebezpečí poškození stroje, ohrožení zdraví osob, nutnost okamžité opravy |

Tab. 3 Rozdělení stavu stroje

Hodnocením vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech se zabývá norma ČSN ISO 10816-3. To je prováděno pomocí hodnoty RMS rychlosti vibrací ve frekvenčním pásmu 10-1000Hz. Pro stroje střední velikosti o příkonu 15-300kW a tuhé uložení jsou stanoveny následující prahové hodnoty:

| RMS rychlosti vibrací [mm/s] | Stav stroje |
|------------------------------|-----------------------------|
| do 1,4 | Nově přejímané stroje |
| 1,4 - 2,8 | Neomezený dlouhodobý provoz |
| 2,8 - 4,5 | Omezený provoz |
| 4,5 a více | Riziko poškození |

Tab. 4 Hodnocení strojů na základě RMS rychlosti vibrací [25]

Při návrhu prahových hodnot pro konkrétní stroj se vychází zpravidla z předchozích zkušeností. Ve výzkumném centru INTEMAC takovéto zkušenosti dosud nebyly, proto byly prahové hodnoty nastaveny dle normy ČSN ISO 10816-3.

V každém obráběcím procesu je důležitým faktorem stav řezného nástroje. V důsledku opotřebení může docházet nejen ke zvyšování vibrací a hluku, ale i k rychlejší degradaci součástí obráběcího stroje a vyšší zmetkovitosti výrobků. Z těchto důvodů je online sledování opotřebení řezného nástroje velmi důležitým prvkem diagnostického systému.

Získaná data vibrací byla průměrována v každém průjezdu nástroje, a to pomocí programu *IsoMean*. Byl určen přesný čas trvání jednoho obráběcího cyklu (průjezd nástroje v záběru a návrat do počáteční polohy) a v daném časovém úseku byla data zprůměrována. Pokud by byl diagnostický systém spjatý s řídicím systémem obráběcího stroje, bylo by možné určit vyhodnocovaný časový úsek přesněji pomocí pokynů prováděných v řídicím systému stroje.

Je třeba poznamenat, že pro každý sledovaný nástroj a dané řezné podmínky je třeba provést experimentální test životnosti a sledováním vibrací ve výše uvedených frekvenčních rozsazích určit prahové hodnoty. Snímané vibrace jsou silně závislé na průměru, počtu zubů a geometrii nástroje, radiální šířce záběru, řezné rychlosti a dalších řezných podmínkách.

Jako doplněk monitorovacího systému byl vytvořen program *IsoVal* pro určování provozního stavu stroje. Základní rozdělení stavu bylo učeno dle tabulky 5. Pro určení, v jakém stavu se stroj nachází, byly použity tresholdy RMS rychlosti vibrací dle ČSN ISO 10816-3. Tato sledovaná hodnota byla vyhodnocena jako nejvhodnější z dostupných signálů. V případě úplného propojení s řídicí jednotkou obráběcího stroje by bylo přesnější určovat stav stroje dle spuštěného programu v řídicí jednotce stroje.

| RMS rychlosti vibrací [mm/s] | Stav stroje |
|------------------------------|-----------------|
| do 0,05 | Vypnuto |
| 0,05 – 0,2 | Zapnuto |
| 0,2 – 1,0 | Lehké obrábění |
| 1,0 a více | Těžké hrubování |

Tab. 5 rozdělení stavu obráběcího stroje dle RMS rychlosti vibrací

Byly vytvořeny programy *IsoHistSave* a *IsoSumSave* pro ukládání průběhu stavu během dne (směny) a pro ukládání celkových časů pro které se stroj nacházel v jednotlivých stavech. Formát ukládaných dat byl opět zvolen textový CSV. Ukázka uloženého souboru s celkovými časy stavů stroje je na obrázku 24. Z obrázku lze vidět, že vytvořené programy jsou připraveny pro použití více kanálů z důvodu možnosti sledování dalších připojených strojů (např. dopravník). Důvodem určování a ukládání provozního stavu stroje je získání dat o efektivnosti výroby, kontrola průběhu výroby a zjištění délky prostojů stroje.

| | A | B | C | D | E |
|----|---|----------|----------|----------|----------|
| 1 | Celkove vyuziti stroje od 2020-3-16 [h] | Channel1 | Channel2 | Channel3 | Channel4 |
| 2 | Vypnuto: | 1855,769 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | Zapnuto bez obrabeni: | 1,663611 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | Lehke hrubovani: | 0,551389 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | Tezke hrubovani: | 0,026667 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | Error: | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | | | | | |
| 8 | | | | | |
| 9 | | | | | |
| 10 | | | | | |
| 11 | Vyuziti stroje dne 2020-3-16 [h] | Channel1 | Channel2 | Channel3 | Channel4 |
| 12 | Vypnuto: | 10,06972 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | Zapnuto bez obrabeni: | 0,001944 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | Lehke hrubovani: | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | Tezke hrubovani: | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | Error: | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | | | | | |
| 18 | | | | | |
| 19 | Vyuziti stroje dne 2020-3-17 [h] | Channel1 | Channel2 | Channel3 | Channel4 |
| 20 | Vypnuto: | 23,99806 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | Zapnuto bez obrabeni: | 0,001944 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | Lehke hrubovani: | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | Tezke hrubovani: | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | Error: | 0 | 0 | 0 | 0 |

Obr. 24 Výřez uložených dat o využití stroje, zobrazeno v programu MS Excel 2013

5.2.3 Vizualizace sledovaných dat

Poslední částí projektu MCFV1680Diag je rozhraní mezi diagnostickým systémem a člověkem (obsluhou). Pro tento účel byla vytvořena vizualizace sledovaných dat, skládající se z 6 následujících karet. V dolní části obrazovky jsou ovládací tlačítka pro přepínání mezi kartami, v horní části potom přihlášení obsluhy, aktuální datum a čas a tlačítko pro volbu jazyka – anglického (základní), německého nebo českého.

Hlavní strana

Na hlavní straně jsou zobrazeny základní informace o stavu stroje. V dolní části se zobrazuje status stroje (v pořádku/varování/alarm), doplněný o barevný indikátor. Jsou zde zobrazeny aktuální hodnoty RMS rychlosti vibrací, a to v celém frekvenčním spektru, v okolí otáčkové a zubové frekvence a v oblasti vyšších frekvencí 9-10kHz.

Karta využití stroje

Zde jsou zobrazeny časy, po které byl stroj vypnut, zapnut bez obrábění nebo zapnut s obráběním. Graficky je znázorněn vývoj procentuálního časového vytížení stroje.

Karta upozornění

Pomocí funkcí z knihovny MpAlarmX jsou konfigurovány dříve zvolené prahové hodnoty. Je jim přiřazena důležitost a reakce, kterou mají vyvolat (například upozornění obsluhy, zpomalení či úplné zastavení stroje).

Karta monitorování teploty

Zobrazuje aktuální hodnotu a graf vývoje teplot snímaných na vřetení stroje.

Karta SDM (z angl. System Diagnostics Manager)

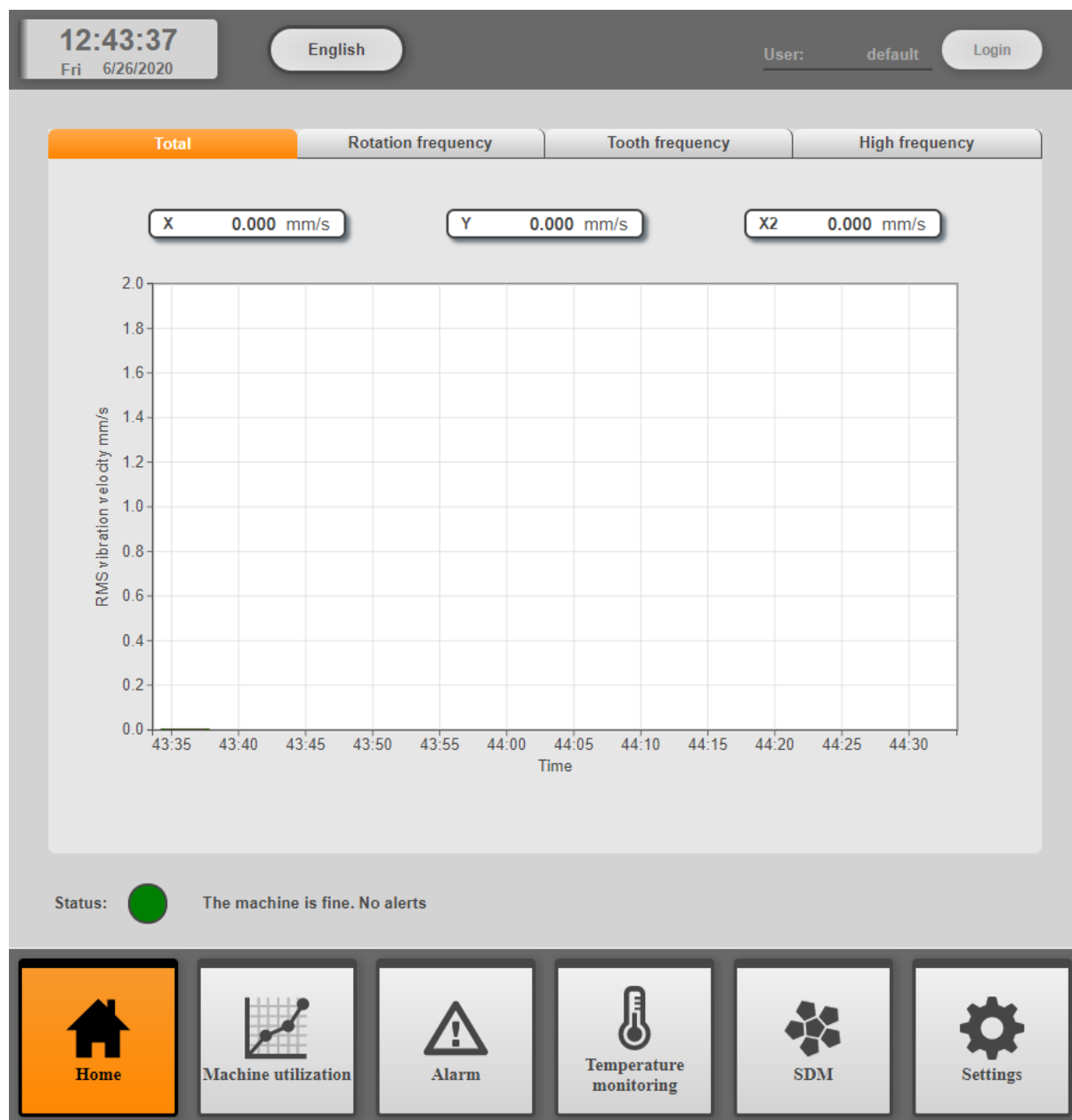
V kartě označené jako SDM je obsažena diagnostika samotného systému pro monitoring obráběcího procesu. Obsahuje například údaje o teplotě, vytíženosti paměti

a výpočetního výkonu CPU, správnosti zapojení systému nebo vzniklých problémech a chybách v systému.

Karta nastavení

V kartě nastavení lze upravovat zvolené prahové hodnoty. Protože jde do citlivé hodnoty pro chod diagnostického systému (a kontrolu stavu stroje), je vstup do této karty nastaven pouze pro vybrané pracovníky (administrátor a vedoucí pracovník údržby).

Z důvodu množství a velikosti obrázků, je přiložen pouze obrázek hlavní karty vizualizace dat (obr. 25). Obrázky ostatních karet jsou obsaženy v příloze této práce.



Obr. 25 Hlavní karta uživatelského rozhraní

6 Experimentální ověření funkčnosti platformy

6.1 Ověření správnosti použitých principů

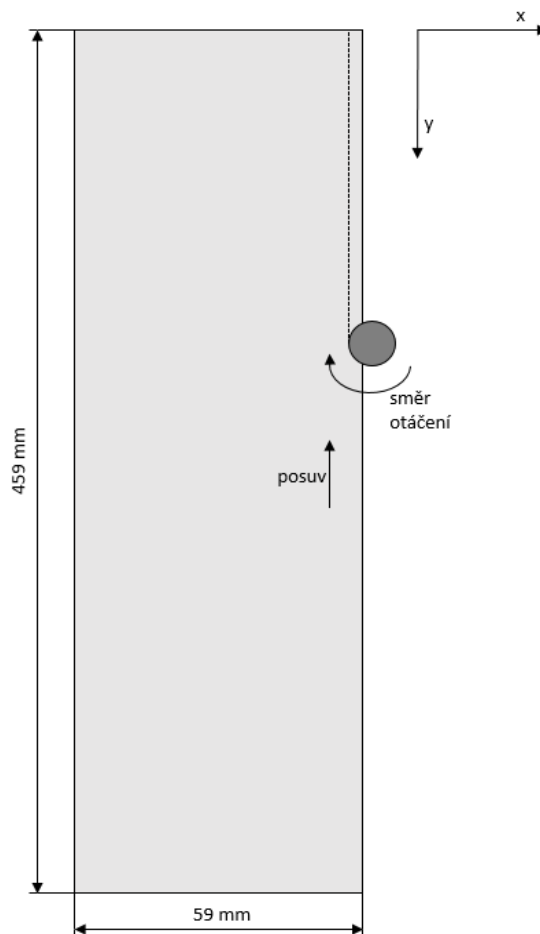
Byla dodána sada 11 kusů HSS frézovacích nástrojů, na nichž bylo provedeno měření vývoje opotřebení při čelním sousledném frézování. Šlo o čtyřzubé frézy o průměru 10 mm s označením Swiss Tech SWT-163-0910A HSS-Co 8% (obr. 26). Jako obrobek byl použit blok oceli 11 500 o rozměrech 459 x 59 x 116 mm (obr. 27). Znázornění upnutí obrobku vůči souřadnému systému stroje je na obrázku 28.



Obr. 26 HSS frézovací nástroj



Obr. 27 Obrobek



Obr. 28 Znázornění pozice nástroje a obrobku

Nástroj byl upnut do vřetena pomocí upínače Weldon SK40, 12x50, DIN 69871AD. Směr frézování byl zvolen ve směru osy y. Obrábění se skládalo z jednotlivých průjezdů nástroje s definovanými řeznými podmínkami. Z důvodu urychlení opotřebení nástroje probíhalo obrábění bez mazání a chlazení nástroje.

Pomocí akcelerometrů a PLC byly zaznamenávána data vibrací ve směru os x a y, aktuální otáčky a zatížení vřetena. Pomocí 3D mikroskopu bylo měřeno abrazivní opotřebení na hřbetu nástroje.

Po odladění optimálních podmínek obrábění na prvním zkušebním nástroji bylo změřeno 10 nástrojů. Jeden z nich však byl špatně upnut, během obrábění se vysunul z upínače a zlomil. Z tohoto důvodu jej nelze použít při vyhodnocování opotřebení a bude zpracován samostatně. Řezné podmínky jsou zaznamenány v tabulce 6:

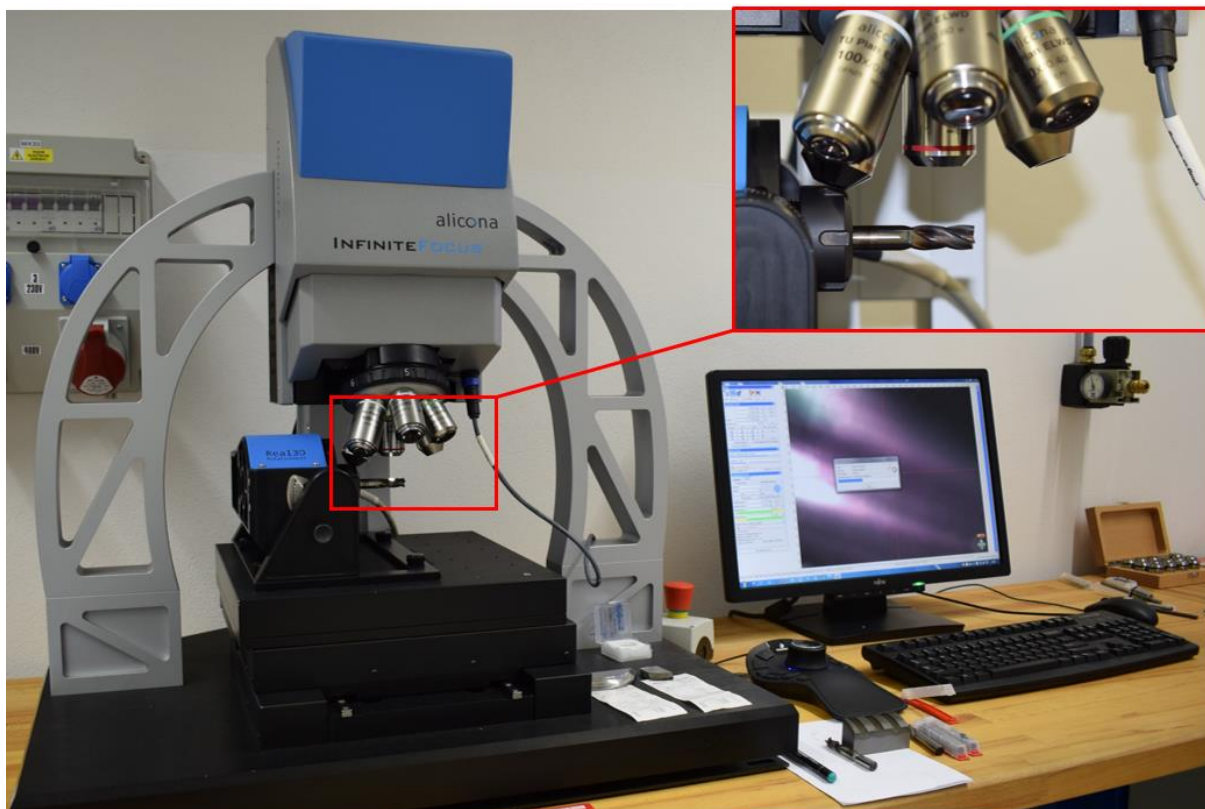
| | Posuvová rychlost v_f [mm/min] | Řezná rychlost v_c [mm/min] | Radiální záběr ostří a_e [mm] | Axiální šířka záběru a_p [mm] | Otáčky n | posuv na zub f_{zu} [mm/zub] |
|----------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|--------------------------------|
| Nástroj 1 a 2 | 300 | 63 | 0,5 | 15 | 2000 | 0,375 |
| Nástroj 3 - 10 | 300 | 63 | 2 | 15 | 2000 | 0,375 |

Tab. 6 Řezné podmínky

6.1.1 Měření opotřebení

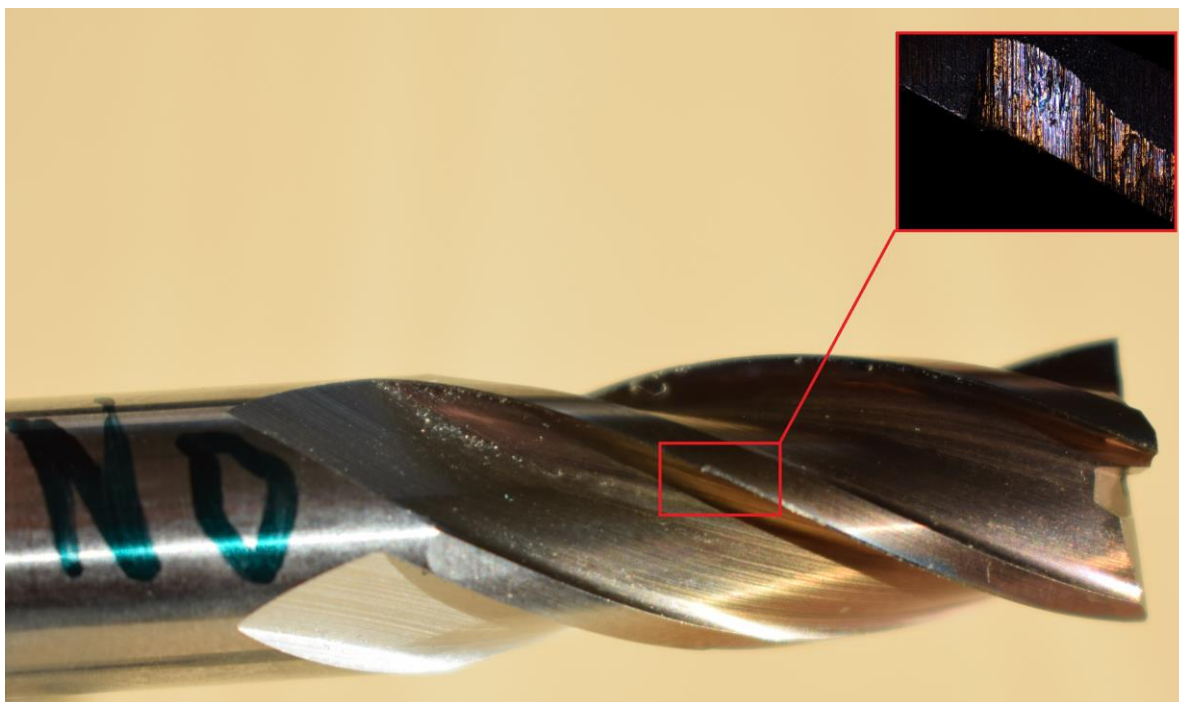
Cílem tohoto experimentu bylo zjistit vývoj hodnot vibrací s rostoucím opotřebením. Při frézování dochází k abrazivnímu opotřebení na hřbetu nástroje. K jeho měření bylo třeba nástroj po každém průjezdu vyjmout z upínače, vložit do 3D mikroskopu, změřit opotřebení a upnout zpět do upínače.

Samotné měření opotřebení na hraně nástroje bylo prováděno pomocí 3D mikroskopu Alicona InfiniteFocus, typ IFM G4 (obr. 29). Jedná se o optické zařízení pro měření tvaru a drsnosti povrchu a zkoumání povrchových vad.

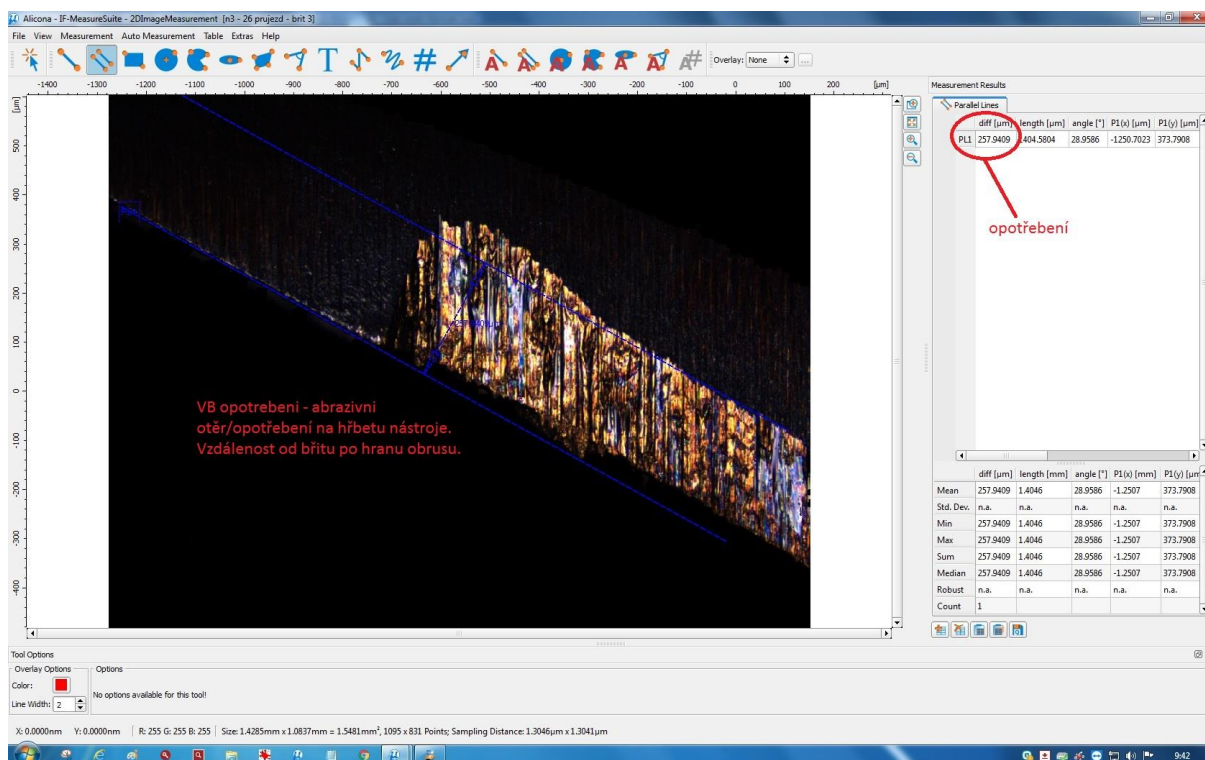


Obr. 29 3D mikroskop Alicona InfiniteFocus

Mikroskopickým objektivem byla zaměřena oblast přechodu mezi opotřebenou a neopotřebenou částí nástroje (obr. 30) a byla změřena vzdálenost od břitu po hranu obrusu (obr. 31).

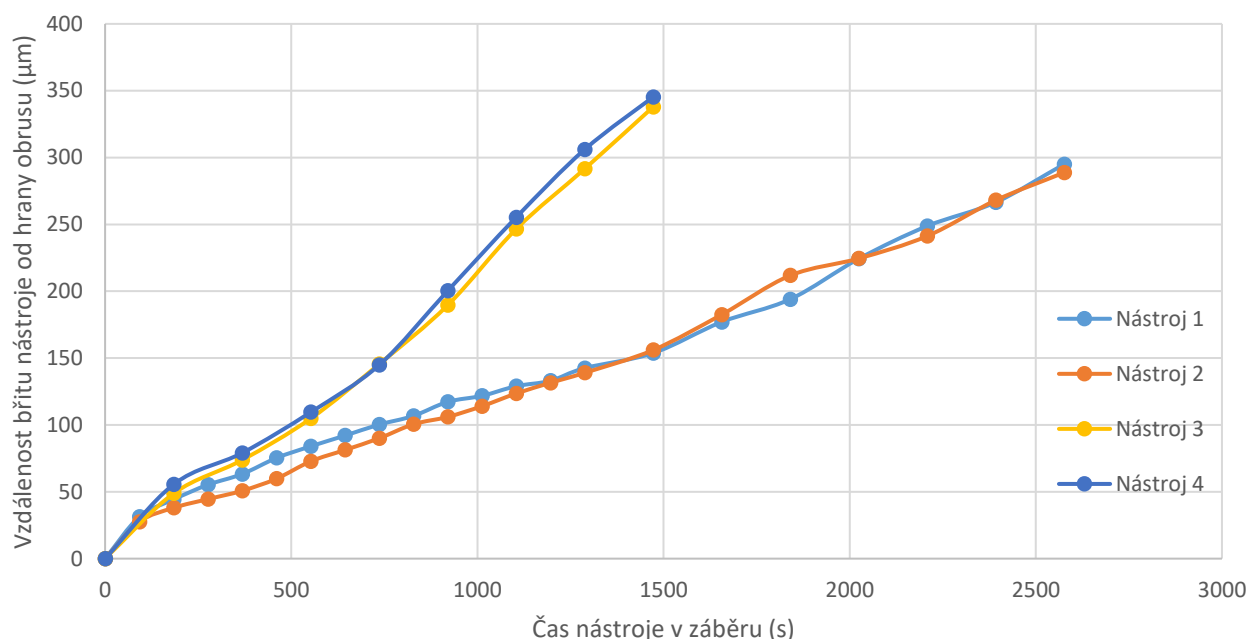


Obr. 30 Oblast přechodu mezi opotřebovanou a neopotřebovanou částí břitu nástroje



Obr. 31 Měření opotřebení

Změřené hodnoty opotřebení byly zpracovány v programu Microsoft Excel 2013. Hodnoty byly vloženy do grafu v závislosti na čase nástroje v záběru (obr. 32).



Obr. 32 Graf závislosti opotřebení bříty nástroje na čase v záběru

Z grafu je zřejmé, že opotřebení frézovacích nástrojů roste po celou dobu obrábění téměř lineárně, s výjimkou prudšího nárůstu během prvních přibližně 60s v záběru. Průběhy opotřebení prvního s druhým nástrojem ($a_e = 0,5\text{mm}$) a třetího se čtvrtým nástrojem ($a_e = 2\text{mm}$) se shodují. Proto nebylo opotřebení břitů u dalších nástrojů měřeno.

6.1.2 Měření vibrací a hluku

Při testovacím obrábění byla provedena validace dat vibrací získaných navrženým diagnostickým systémem. Pro tento účel byla použita aparatura pro měření vibrací od firmy Brüel & Kjær, přičemž byly umístěny dva piezoelektrické akcelerometry typu 4507 B 004 v dolní části vřetena a mikrofon směřující na frézovací nástroj. Přehled měřících zařízení Brüel & Kjær je v tabulce 7:

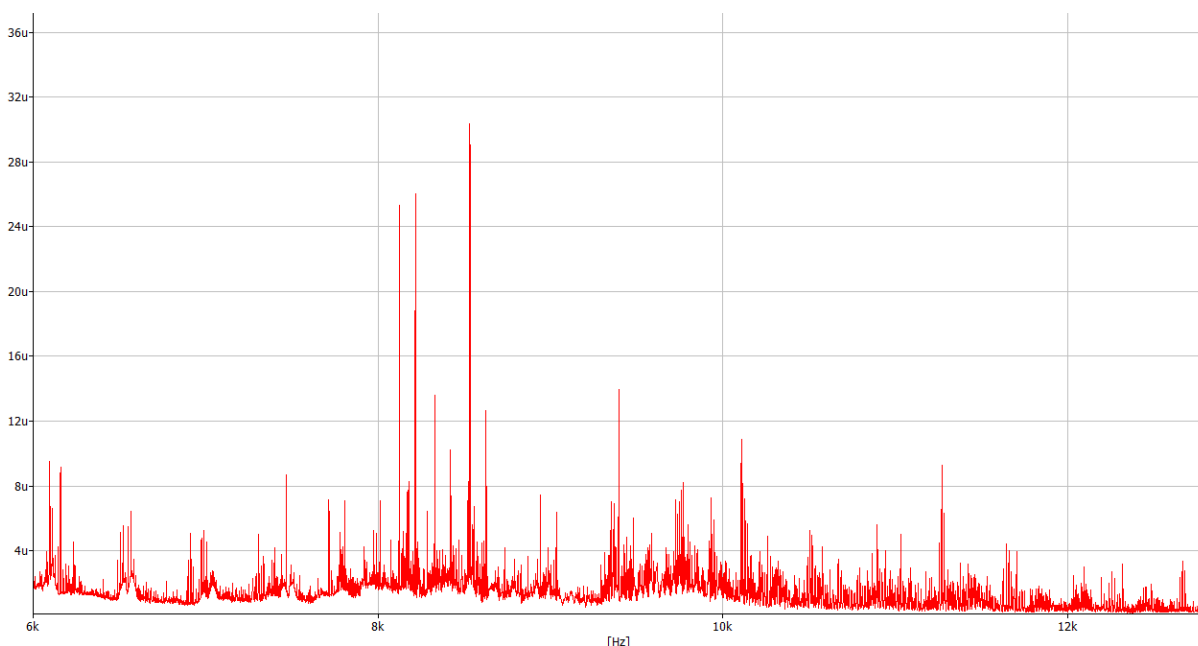
| | Typ | Citlivost | Výrobce |
|--------------------|------------|-------------------|-------------|
| Akcelerometr | 4507 B 004 | 96,74 mV/g | Brüel&Kjaer |
| Akcelerometr | 4507 B 004 | 96,99 mV/g | Brüel&Kjaer |
| Mikrofon | 4189 | -25,2 dB re 1V/Pa | Brüel&Kjaer |
| Modul pro sběr dat | 3160-A-042 | - | Brüel&Kjaer |

Tab. 7 Přehled měřících zařízení Brüel&Kjaer

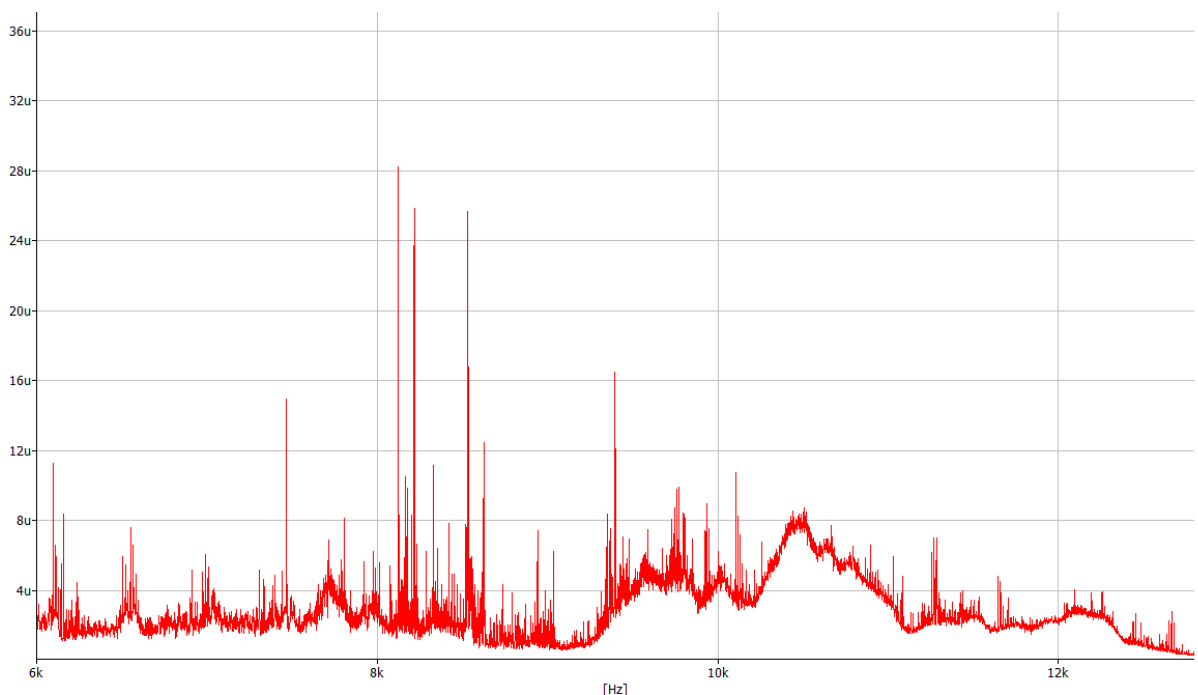
Hodnoty RMS rychlosti vibrací v celém frekvenčním spektru i v oblasti otáčkové a zubové frekvence nástroje byly téměř shodné, rozdíly mezi hodnotami získaných pomocí PLC a pomocí aparatury Brüel & Kjær byly maximálně 3%.

Pomocí FFT byly získána frekvenční spektra každého průjezdu nástroje. Jejich porovnáním bylo zjištěno, že se vzrůstajícím opotřebením rostou sice vibrace v celém frekvenčním spektru, ale výraznější nárůst lze sledovat na otáčkové a především zubové frekvenci nástroje. S narůstajícím opotřebením byl také zjištěn výrazný nárůst vibrací i hluku ve frekvenčním rozsahu přibližně 9-12kHz. Tento jev byl i subjektivně pozorovatelný během obrábění jako „pískání“ nástroje při vyšším opotřebením. Modul

pro měření vibrací CM4810 má nastavitelné frekvenční pásmo pouze do 10kHz, proto byla pro každý průjezd nástroje spočtena RMS hodnota rychlosti vibrací ve frekvenčním rozsahu 9-10kHz. Porovnání frekvenčních spekter signálu je zobrazeno na obrázcích 33 (nový nástroj) a 34 (opotřeбенý nástroj).



Obr. 33 frekvenční spektrum signálu vibrací v 1. průjezdu



Obr. 34 FFT frekvenční signálu vibrací v 10. průjezdu (čas nástroje v záběru 900s)

Dalším důvodem použití aparatury Brüel & Kjær byla analýza hluku v průběhu rostoucího opotřebení nástroje. Na základě rešerše bylo předpokládáno, že se zvýšení opotřebení nástroje projeví výrazněji v signálu hluku než vibrací. Vyhodnocením naměřených dat však bylo zjištěno, že zvýšení hladiny hluku ve sledovaných frekvenčních oblastech sice je zřejmé, ale svým průběhem odpovídá nárůstu vibrací.

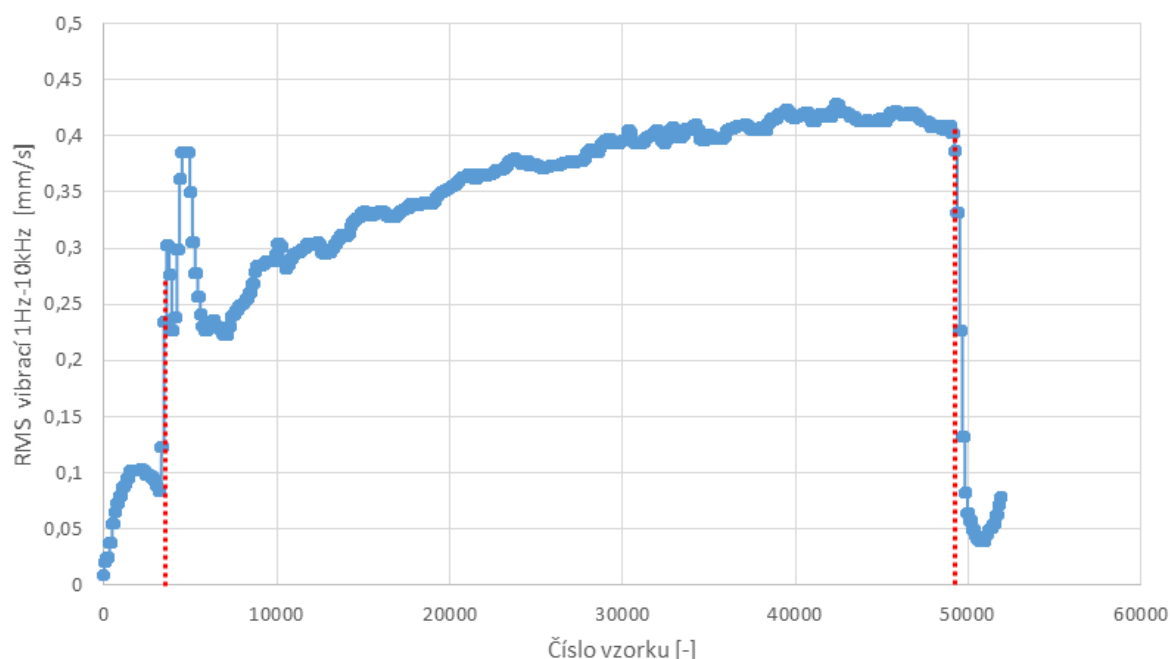
Vezmeme-li do úvahy fakt, že akcelerometry jsou odolnější než akustické snímače, bylo rozhodnuto, že v dalším průběhu měření již nebude hluk zaznamenáván. Celá měřicí aparatura Brüel & Kjær byla demontována, protože hodnoty vibrací bylo snazší zaznamenávat pomocí navrženého diagnostického systému.

Měření a vyhodnocování dat získaných navrženým diagnostickým systémem

Z každého průjezdu byla spočtena průměrná hodnota RMS rychlosti vibrací a to pro:

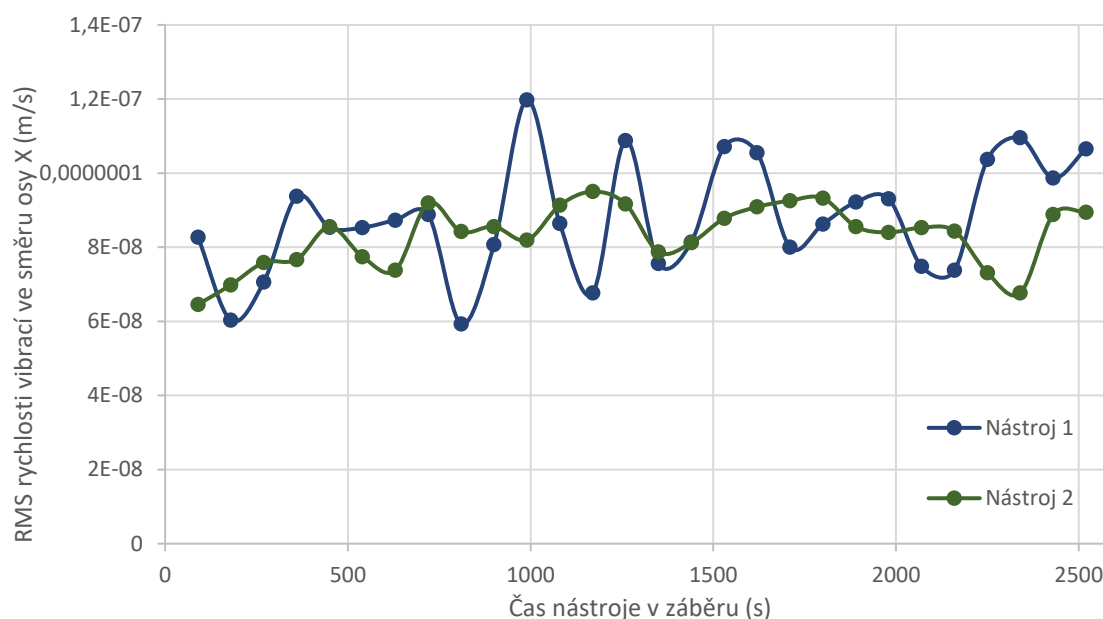
- celé frekvenční spektrum v rozsahu 1-10000Hz
- frekvenční pásmo v okolí otáčkové frekvence 31,3-35,3Hz
- frekvenční pásmo v okolí zubové frekvence 131,3-135,3Hz
- frekvenční pásmo v oblasti vyšších frekvencí 9-10kHz

Pro zpracování dat byly uložené textové soubory importovány do programu MS Excel 2013. Následující zpracování naměřených dat bylo vypracováno pro všechny čtyři uvedené frekvenční rozsahy. Typický průběh vibrací v průběhu průjezdu nástroje je zobrazen na obr. 35. Červenými přerušovanými čarami je naznačena vyhodnocovaná oblast, jejímž zprůměrováním byla získána jediná hodnota vibrací pro každý průjezd nástroje.



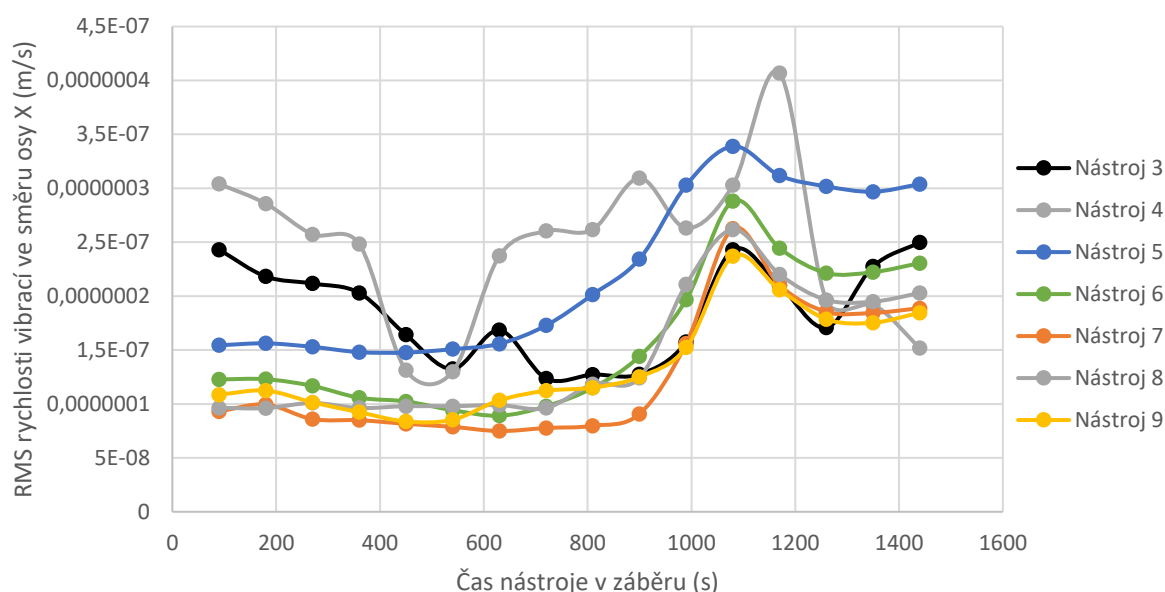
Obr. 35 Časový průběh vibrací (nástroj 3, průjezd 8)

Z průměrných hodnot byly vytvořeny grafy vibrací v průběhu opotřebování nástrojů. Při obrábění s menším radiálním posuvem 0,5mm (nástroje 1 a 2) nevykazuje žádná ze sledovaných hodnot jednoznačný trend (obr. 36). To je způsobeno tím, že vibrace od nástroje jsou přehlušeny vibracemi od samotného stroje.



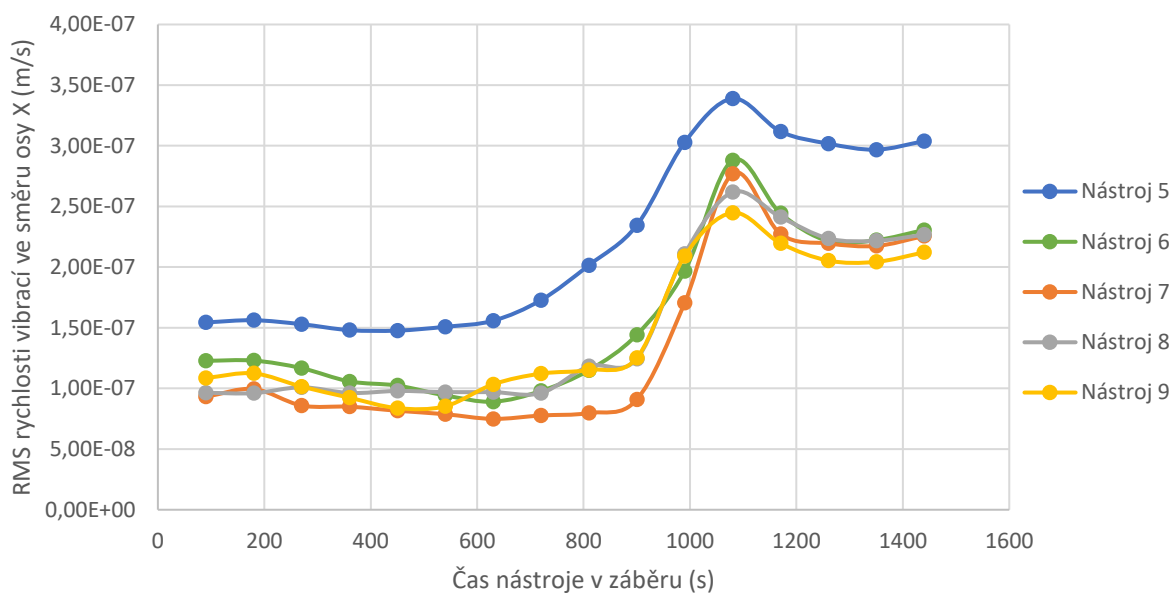
Obr. 36 Graf závislosti celkového úhrnu RMS rychlosti vibrací ve směru x na čase v záběru při radiálním posuvu 0,5mm

Při obrábění s vyšším radiálním posuvem 2mm (obr. 37) již lze vidět větší změny hodnot celkového úhrnu vibrací.



Obr. 37 Graf závislosti celkového úhrnu RMS rychlosti vibrací ve směru x na čase v záběru při radiálním posuvu 2mm

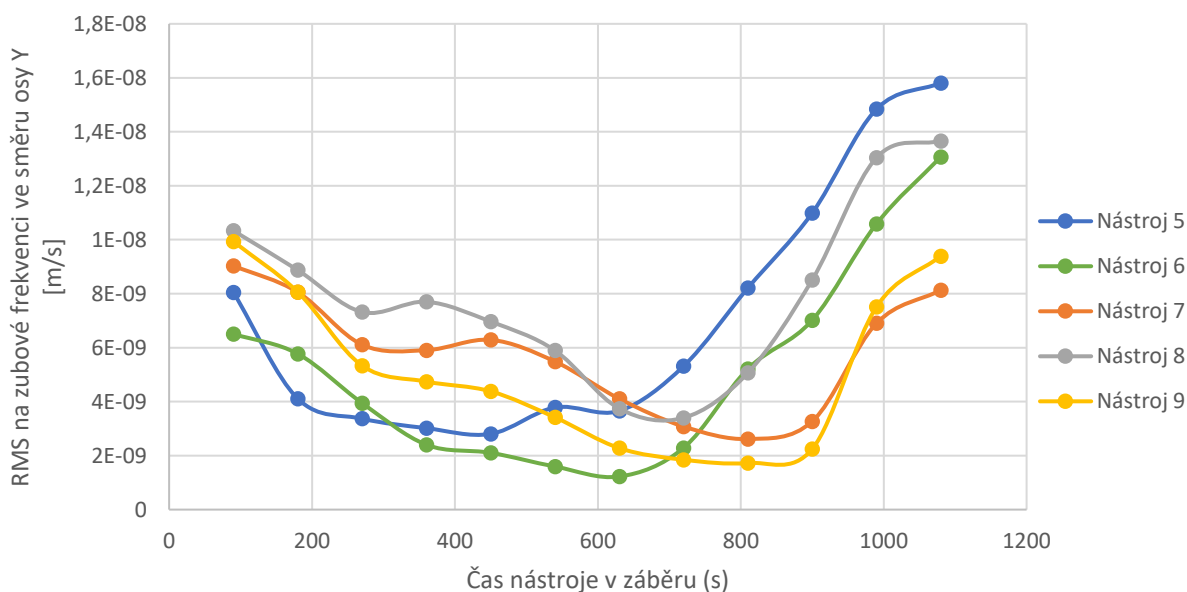
V grafu na obrázku 37 je vidět, že hodnoty vibrací u nástrojů 3 a 4 výrazně kolísají na rozdíl od křivek nástrojů 5-9. Řezné podmínky však byly u všech nástrojů stejné, pouze u nástrojů 5-9 nebylo měřeno opotřebení břitu, nástroj tedy nebyl po každém průjezdu vyjímán a znovu upínán, ale byl celou dobu upnut ve stroji. Právě toto opakované vyjímání a upínání způsobilo u nástrojů 3 a 4 výrazné kolísání hodnot vibrací. Proto jsou tyto data velmi těžko použitelná pro predikci životnosti nástroje a při následujícím zpracování je nebudeme uvažovat.



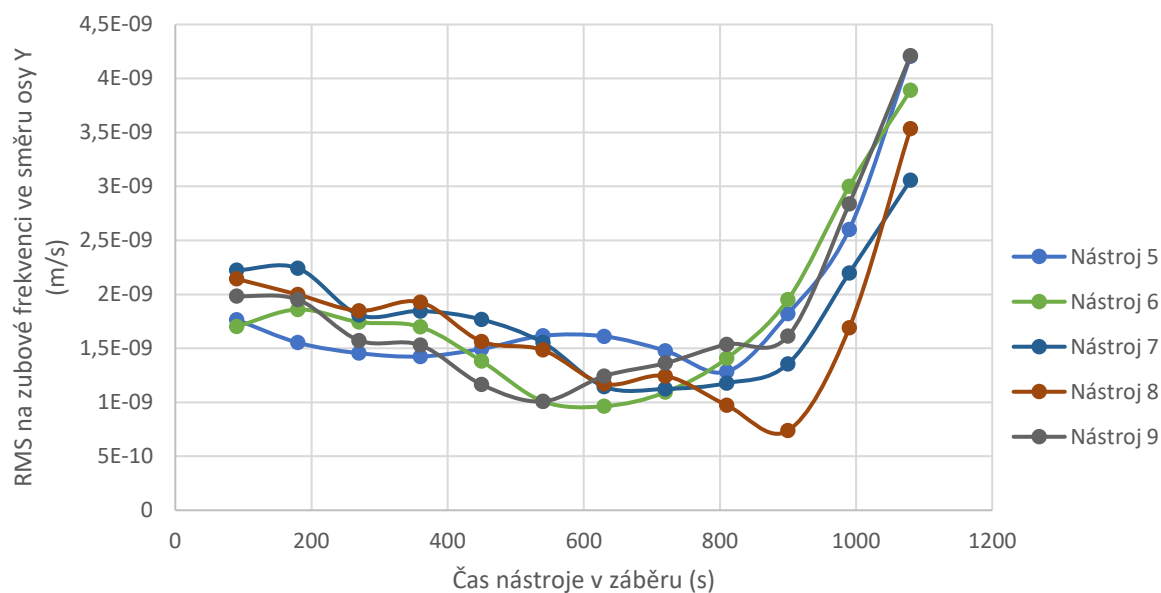
Obr. 38 Graf závislosti celkového úhrnu RMS rychlosti vibrací ve směru x na čase v záběru při radiálním posuvu 2mm – nástroje 5-9

Průběhy hodnot vibrací nástrojů 5 až 9 na obrázku 38 jsou podobné: na začátku životnosti mírný pokles vibrací (záběh nástroje), přibližně mezi časy 800s a 1080s rychlý nárůst vibrací, který je způsoben zvyšujícím se opotřebením nástroje. Na konci životnosti dochází ke snížení hodnoty vibrací, což bylo pozorováno již během obrábění – subjektivně se snížily vibrace i hluk a mezi třískami se objevovaly jiskry. V tuto chvíli již není nástroj v praxi použitelný, obrobený povrch je hrubý a může být i výrazně tepelně ovlivněný. Proto se touto částí nebudeme zabývat (i když by takto nástroj mohl obrábět ještě dále) a pro další zpracování bude uvažována pouze oblast do času 1080s.

Vibrace na zubové frekvenci

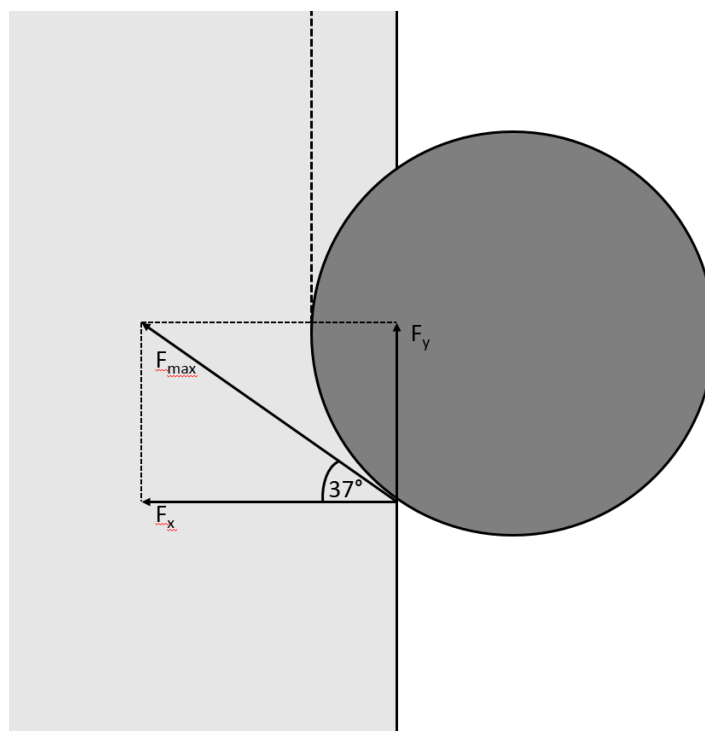


Obr. 39 Graf závislosti RMS rychlosti vibrací na zubové frekvenci ve směru x na čase v záběru při radiálním posuvu 2mm



Obr. 40 Graf závislosti RMS rychlosti vibrací na zubové frekvenci ve směru y na čase v záběru při radiálním posuvu 2mm

Při porovnání hodnot RMS rychlosti vibrací ve směru os x a y zjistíme (obr. 39 a 40), že hodnoty ve směru osy x jsou přibližně 2krát vyšší než ve směru osy y. To je způsobeno především dvěma faktory. Prvním faktorem je nižší tuhost konstrukce stroje ve směru osy x, což bylo potvrzeno výrobcem stroje, společností Tajmac-ZPS. Druhým faktorem je zjištění, že ve směru osy x působí na vřeteno větší síly. Maximální síla při sousledném čelním frézování je při vstupu břitu nástroje do materiálu a má směr tečný k obvodové kružnici nástroje. Při radiálním záběru ostří $a_e=2\text{mm}$ je úhel mezi maximální silou F a kolmicí k povrchu obrobku 37° (obr. 41).



Obr. 41 Směr maximální síly F a její rozložení do směru os x a y

Díky tomuto úhlu můžeme pomocí funkcí sinus a kosinus dopočítat velikost síly působící ve směru osy x a y:

$$F_x = \cos(37^\circ) \cdot F_{max} = 0,8 \cdot F \quad (6.1)$$

$$F_y = \sin(37^\circ) \cdot F_{max} = 0,6 \cdot F \quad (6.2)$$

Síla F_x je tedy o 33% vyšší než síla F_y .

Nastavení prahových hodnot na základě výsledků měření

Na základě získaných průběhů vibrací bylo zjištěno, že s roustoucím opotřebením vykazují nejznatelnější nárůst hodnoty vibrací v pásmech zubové frekvence a vyšších frekvencí (9-10kHz). Byly zvoleny prahové hodnoty, upozorňující na blížící se konec životnosti a na překročení hranice životnosti nástroje (tab. 8). V grafech na obrázcích 39 a 40 je vidět, že se hodnoty vibrací pro jednotlivé nástroje mírně liší. Tento jev může být způsoben pravděpodobně postupným zahříváním obrobku během experimentálního obrábění.

| RMS [mm/s] pro rozsah 131,3-135,3Hz (osa y) | RMS [mm/s] pro rozsah 9-10kHz (osa y) | Stav nástroje |
|---|---------------------------------------|---|
| 0-0,25 | 0-0,08 | Dobrý stav nástroje, neomezený provoz |
| 0,25-0,35 | 0,08-0,12 | Končící životnost, potřeba brzké výměny |
| 0,35 a více | 0,12 a více | Překročená životnost, okamžité zastavení výroby |

Tab. 8 Nastavení prahových hodnot pro monitorování opotřebenění nástroje

Diagnostika nadměrného zatížení nástroje

Jeden z testovaných nástrojů byl špatně upnut do upínače, což způsobilo jeho postupné vysouvání a „zavrtávání“ do obrobku (obr. 43). Nadměrné silové zatížení vedlo ke zlomení nástroje (obr. 42).

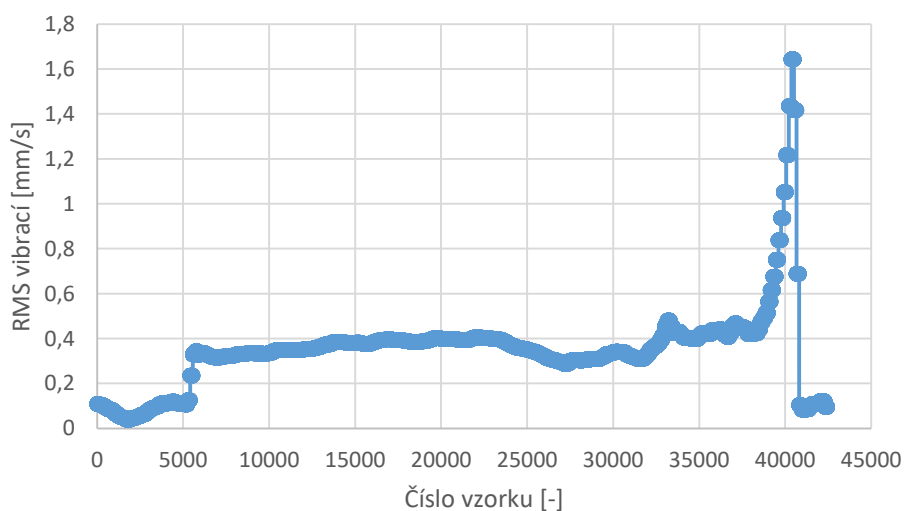


Obr. 42 Zlomená HSS fréza

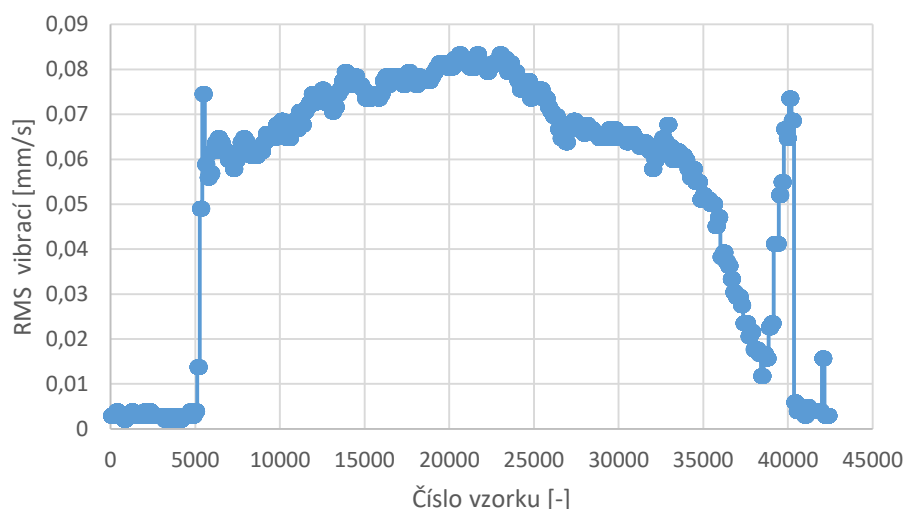


Obr. 43 Drážka v obrobku způsobená špatným upnutím nástroje

Projevem špatného upnutí byl nárůst vibrací v celém frekvenčním spektru kromě zubové frekvence nástroje, kde došlo naopak k poklesu vibrací a zpětnému velmi prudkému nárůstu v okamžiku zlomení nástroje. Tento pokles lze vysvětlit změnou charakteru práce řezného nástroje. Porovnání průběhu vibrací ve frekvenčním pásmu 10-1000Hz a v oblasti zubové frekvence je na obrázcích 44 a 45.



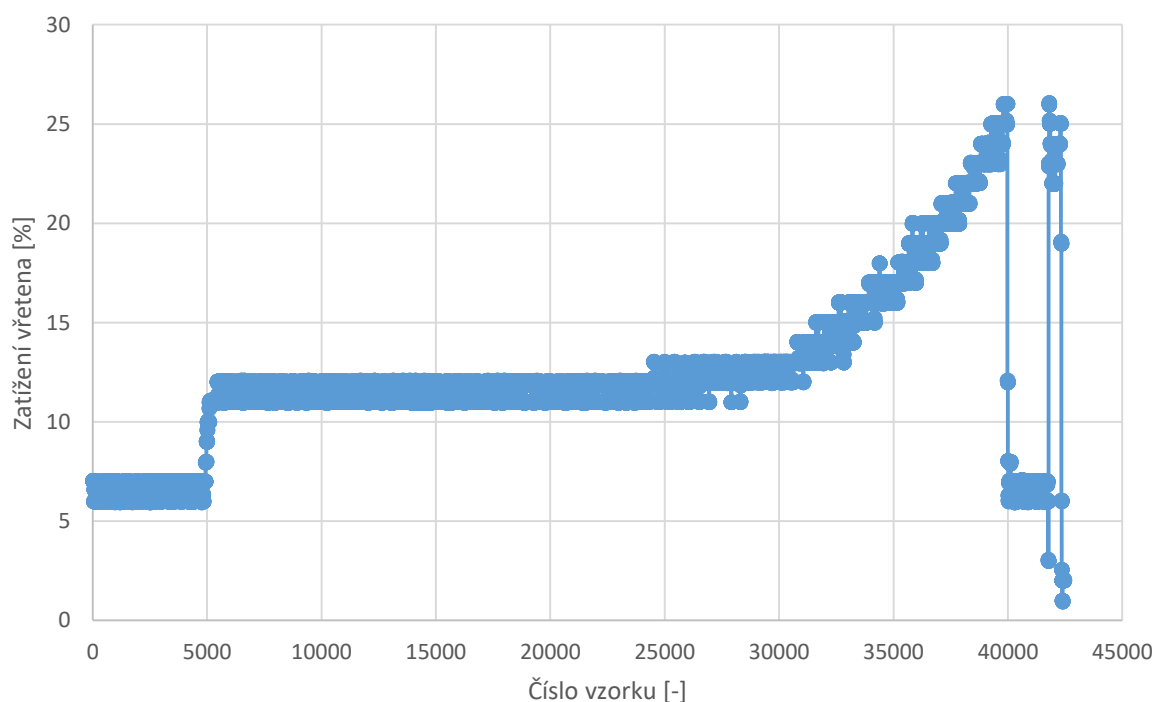
Obr. 44 Průběh vibrací dle ČSN ISO 10816 (pásmo 10-1000Hz) zlomeného nástroje



Obr. 45 Průběh vibrací v oblasti zubové frekvence zlomeného nástroje

Z průběhu vibrací v pásmu 10-1000Hz dle ČSN EN 10816 lze vidět, že maximální hodnota RMS rychlosti vibrací byla ve chvíli zlomení nástroje $v_{ef}=1,64\text{mm/s}$. Pro robustní konstrukci stroje však nebyla tato hodnota nebezpečná a vibrace se neprojevovaly žádnými negativními jevy. Norma hodnotí tuto velikost vibrací sice jako zvýšenou, ale neomezující dlouhodobý provoz stroje. Proto bylo rozhodnuto, že prahové hodnoty nastavené dle této normy jsou vhodné pro obráběcí centrum MCFV 1680 a budou i nadále používány pro hodnocení stavu stroje.

Bylo zjištěno, že s rostoucím zatížením nástroje rostlo i procentuální zatížení vřetena (obr. 46), což byl jeden z analogových vstupních signálů. Sledování této veličiny se ukázalo jako velmi vhodné pro zjištění nadměrného zatížení nástroje. Naopak pro monitorování abrazivního opotřebení nástroje je tato veličina nevhodná.



Obr. 46 Průběh zatížení vřetena před zlomením nástroje

7 Závěr

Práce byla rozvržena do pěti hlavních kapitol. V teoretické části byly popsány základy údržby obráběcích strojů, přičemž samostatná kapitola byla věnována vibrodiagnostice. Na základě získaného všeobecného přehledu o problematice monitoringu obráběcího procesu, byla provedena analýza řešeného problému, na jejímž základě byla vybrána metoda řešení problému. V praktické části byl navržen systém pro monitorování obráběcího procesu. Pro zvolený hardware bylo vytvořeno softwarové řešení, založené především na sledování vibrací, doplněné o data z řídicí jednotky stroje a ze senzorů teploty. Pro komunikaci diagnostického systému s obsluhou stroje byla navržena vizualizace.

Podstatným bodem práce bylo navržení vhodných prahových hodnot, rozlišující tři základní stavy stroje – dobrý stav (neomezený provoz stroje), varování (omezený provoz) a alarm (zastavený provoz). Z důvodu nedostatku předchozích zkušeností s takovýmto návrhem, byly počáteční prahové hodnoty zvoleny podle normy ČSN ISO 10816-3.

Funkčnost navrženého systému byla ověřena experimentálním frézováním. Během obrábění bylo zjištěno, že prahové hodnoty dle normy dobře odpovídají měřenému stroji Tajmac-ZPS MCFV 1680. V oblasti monitorování opotřebení frézovacího nástroje bylo zjištěno, že vhodnými veličinami jsou hodnoty RMS rychlosti vibrací ve frekvenčních pásmech zubové frekvence a vyšších frekvencí. Pro testovací nástroj, použitý v této práci, to byly pásma 131,3-135,3Hz a 9-12kHz. V těchto frekvenčních pásmech byly stanoveny prahové hodnoty vibrací upozorňující na nárůst opotřebení nástroje.

Nastane-li situace, že je špatně upnut nástroj do upínače, hrozí v důsledku zvýšeného silového zatížení zlomení nástroje. V takovém případě rostou velmi výrazně vibrace v celém frekvenčním spektru s výjimkou zubové frekvence, na které dochází naopak k poklesu vibrací a zpětnému prudkému nárůstu těsně před samotným zlomením nástroje. Vhodným ukazatelem nadměrného zatížení nástroje je hodnota zatížení vřetena, získaná z řídicího systému obráběcího stroje. Byl zaznamenán prudký nárůst zatížení vřetena předcházející zlomení nástroje. Naopak ke sledování trendu opotřebování nástroje je tato veličina nevhodná.

Bylo potvrzeno, že vibrodiagnostika je nejvhodnější metodou pro diagnostiku obráběcích strojů a procesů. V průběhu experimentálního obrábění bylo sice zjištěno, že akustický hluk dává podobně hodnotné informace o opotřebení nástroje jako vibrace, ale v praktickém použití je náchylnější například k nečistotám a k rušení jinými zdroji hluku.

Hlavním problémem při vývoji diagnostických systémů obráběcích strojů je nutnost jeho nastavení zvlášť pro každý typ stroje, a tedy provedení řady zkoušek a experimentů pro zjištění vhodných sledovaných prahových hodnot. Diagnostika samotného obráběcího procesu je v tomto ohledu ještě náročnější, protože je třeba provést experimentální obrábění pro každý použitý nástroj a dané rezné podmínky.

Byla zjištěna další problematická oblast použití vibrodiagnostiky, kterou je monitorování obráběcího procesu s malým záběrem nástroje. Malá šířka záběru nástroje způsobuje nízké hodnoty zatížení, a tedy i vibrací, které jsou přehlušeny vibracemi od pohyblivých součástí obráběcího stroje.

Cíle práce, kterými byly hardwarový i softwarový návrh systému pro online monitorování obráběcího procesu a experimentální ověření jeho funkčnosti, lze označit za splněné v plném rozsahu. Navržené funkce diagnostického systému umožňují jeho nasazení na daný obráběcí stroj.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. Praha: Professional Publishing, 2013, 628 s. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [2] KORBEL, Petr. *Průmyslová revoluce 4.0: Za 10 let se továrny budou řídit samy a produktivita vzroste o třetinu*. [online]. 17. 5. 2015, Hospodářské noviny [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://byznys.ihned.cz/c1-64009970-prumyslova-revoluce-4-0-za-10-let-se-tovarny-budou-ridit-samy-a-produktivita-vzroste-o-tretinu>
- [3] ČSN EN 13306. *Terminologie údržby*. Praha: Český normalizační institut, 2018, 60 s. Třídící znak 010603
- [4] VDOLEČEK, František. *Technická diagnostika v systémech údržby* In: AUTOMA [online]. 2008, [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37313.pdf>
- [5] KRUPA, Miroslav. *Prediktivní údržba a metody technické prognostiky: seznámení se s problematikou*. In: Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti [online], 2011, roč. 4, č. 4. Dostupné z: http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-04-2011/prediktivni_udrzba_krupa.html. ISSN 1803-3687.
- [6] PLC - Programovatelný logický automat [online]. PLC Automatizace, 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://plc-automatizace.cz/knihovna/plc.htm>
- [7] VDOLEČEK, František. *Spolehlivost a technická diagnostika* [online]. Brno, 2002 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://anzdoc.com/spolehlivost-a-technicka-diagnostika.html>
- [8] SVOBODA, Štěpán. *Spolehlivá a rychlá kontrola strojů a zařízení vedoucí ke snížení nákladů a provozních ztrát*. In: ŘÍZENÍ A ÚDRŽBA průmyslového podniku [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: [http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=5708&type=98](http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=5708&type=98)
- [9] SVOBODA, Štěpán. *Termokamery a vysokorychlostní kamery pro zvýšení kvality a snížení nákladů* [online]. [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/3950-termokamery-a-vysokorychlostni-kamery-pro-zvyseni-kvality-a-snizeni-nakladu>
- [10] MAREK, Vladislav a Ladislav HRABEC. *Tribotechnická diagnostika*. In: ŘÍZENÍ A ÚDRŽBA průmyslového podniku [online]. 2013 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://udrzbapodniku.cz/hlavnimenu/artykuly/artikul/article/tribotechnicka-diagnostika/>

- [11] HAMERNÍK, Jan. *Základy obrábění* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>
- [12] HUANG, S. N., K. K. TAN, Y. S. WONG, C. W. DE SILVA, H. L. GOH a W. W. TAN. *Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring. International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2006, s. 444-451 . DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.06.011.
- [13] Cutting force measurement [online]. Kistler, 2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=539&model=download>
- [14] DIMLA, E. a Snr. DIMLA. *Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - a review of methods. Machine Tools & Manufacture* [online]. 1999, č. 40, s. 1073-1098. DOI: S0890-6955(99)00122-4.
- [15] 4189-A-021 [online]. BRÜEL & KJÆR, 2020 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/microphone-preamplifier-combinations/4189-A-021>
- [16] HUMÁR, Anton. *Technologie 1: Technologie obrábění-1.část* [online]. Brno, 2003. [cit. 2019-05-16]. 138 s. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/DT3MK_STR3/um/TI_TO-1cast.pdf
- [17] RUDOLF, Brepta, LADISLAV, Pust, FRANTIŠEK, Turek. *Mechanické kmitání: Technický průvodce*. 1. vyd. [s.l.] : SOBOTÁLES, 1994. 592 s. ISBN 80-901684-8-5.
- [18] KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika*. Praha: BENtechnická literatura, 2006. 406 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [19] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1995, 389 s. ISBN 80-010- 2246-3.
- [20] VOJÁČEK, Antonín. *Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů* [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>
- [21] TETI, R., K. JEMIELNIAK, G. O'DONNELL a D. DORNFELD. Advanced monitoring of machining operations. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2010, č. 59, s. 717-739. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.010.
- [22] BRÜEL & KJÆR, *Měření chvění*. Dánsko: K.Larsen & Søn A/S – DK-2600 Glostrup, Czech DK BR 0123.
- [23] BRÜEL & KJÆR, *Sledování provozního stavu strojních zařízení*. Dánsko: K.Larsen & Søn A/S – DK-2600 Glostrup, Czech DK BR 0699-11.
- [24] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.

- [25] BRAND, Thomas. *Demands on Sensors for Future Servicing: Smart Sensors for Condition Monitoring* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/a60151-demands-on-sensors-for-future-servicing-smart-sensors-for-condition-monitoring.html>
- [26] JANÍČEK, Přemysl. *Systémová metodologie: brána do řešení problémů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 978-80-7204-887-8.
- [27] MCFV 1680 [online]. Tajmac-ZPS, 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.tajmac-zps.cz/mcfv-1680>
- [28] Automation Studio [online]. BR Automation, 2020 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/>
- [29] ČSN EN 10816-3. *Vibrace - Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 3: Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 1/min a 15 000 1/min při měření in situ*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 20 s. Třídící znak 011412.

9 Seznam použitých zkratek a symbolů

| Symbol | Rozměr | Význam |
|-----------|----------------------|--|
| a_e | [mm] | radiální šířka záběru ostří |
| a_p | [mm] | axiální šířka záběru |
| a | [mm/s ²] | zrychlení |
| b | [Nsm ⁻¹] | koeficient tlumení |
| B_d | [mm] | je průměr valivého elementu |
| BPFI | [Hz] | frekvence defektu na vnitřní dráze ložiska |
| BPFO | [Hz] | frekvence defektu na vnější dráze ložiska |
| BSF | [Hz] | frekvence defektu valivého elementu ložiska |
| CF | [-] | crest factor |
| e | [-] | Eulerovo číslo |
| f | [Hz] | frekvence |
| f_{vz} | [Hz] | vzorkovací frekvence |
| f_z | [Hz] | zubová frekvence |
| f_{zu} | [mm] | posuv na zub |
| f_r | [Hz] | frekvence daná otáčkami vnitřního a vnějšího kroužku |
| F | [N] | řezná síla |
| F_x | [N] | řezná síla ve směru osy x |
| F_y | [N] | řezná síla ve směru osy y |
| $F(t)$ | [N] | časová funkce síly |
| FTF | [Hz] | frekvence defektu klece ložiska |
| g | [m/s ²] | gravitační zrychlení |
| j | [-] | imaginární číslo |
| k | [N/m] | tuhost |
| m | [kg] | hmotnost |
| n | [min ⁻¹] | otáčky za minutu |
| n | [-] | počet valivých elementů ložiska |
| N | [-] | počet vzorků signálu |
| P_d | [mm] | roztečný průměr |
| r | [Hz] | rozestup mezi spektrálními čarami |
| RMS | [-] | efektivní hodnota (Root mean square) – obecně |
| t | [s] | čas |
| T | [s] | perioda |
| v_c | [mm/min] | řezná rychlost |
| v_f | [mm/min] | posuvová rychlost |
| VB | [mm] | šířka opotřebení hřbetu nástroje |
| x | [-] | obecná souřadnice |
| x_{ef} | [-] | efektivní hodnota (Root mean square) – obecně |
| x_f | [mm] | rozkmít |
| x_v | [mm] | výkmit |
| x_0 | [mm] | amplituda |
| $x(t)$ | [-] | časová funkce spojitého signálu |
| \bar{x} | [-] | střední hodnota – obecně |
| z | [-] | počet zubů nástroje |
| φ | [rad] | počáteční fáze |
| ω | [s ⁻¹] | úhlová rychlost |
| β | [°] | úhel dotyku |
| π | [-] | Ludolfovo číslo |

Zkratka Význam

| | |
|-----|---|
| 3D | třídimenzionální prostor |
| A/D | analog/digital |
| CNC | počítačové číslicové řízení (Computer Numerical Control) |
| CPU | centrální procesorová jednotka (Central Processing Unit) |
| CSV | hodnoty oddělené čárkami (Comma separated values) |
| DFT | diskrétní Fourierova transformace |
| FFT | rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier transform) |
| HSS | rychlořezná ocel (High Speed Steel) |
| NC | číslicové řízení (Numerical Control) |
| PLC | programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller) |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Dělení údržby volně podle ČSN EN 13306 [3] | 13 |
| Obr. 2 Měření pomocí termokamery [9] | 15 |
| Obr. 3 Typy dynamometrů – vlevo deskový, vpravo rotační [13] | 16 |
| Obr. 4 Mikrofon výrobce Brüel & Kjær [15] | 16 |
| Obr. 5 Rozdělení kmitání podle prostředí | 17 |
| Obr. 6 Základní charakteristiky harmonického signálu [7] | 20 |
| Obr. 7 Vztahy mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením vibrací [22]..... | 21 |
| Obr. 8 Princip snímačů výchylky [20]..... | 21 |
| Obr. 9 Způsoby konstrukce snímačů rychlosti [20] | 22 |
| Obr. 10 Konstrukce piezoelektrických akcelerometrů [22] | 23 |
| Obr. 11 Frekvenční měřicí rozsah senzorů vibrací [23] | 24 |
| Obr. 12 Frekvenční spektrum signálu vibrací [25]..... | 27 |
| Obr. 13 Struktura systému podstatných veličin [26]..... | 30 |
| Obr. 14 Vertikální obráběcí centrum Tajmac-ZPS MCFV 1680 [27] | 32 |
| Obr. 15 Pohyb stroje v osách X, Y a Z..... | 33 |
| Obr. 16 Umístění akcelerometrů na vřeteník | 34 |
| Obr. 17 Umístění třetího akcelerometru v horní části vřeteníku | 35 |
| Obr. 18 Umístění snímačů teploty P016-4050 | 36 |
| Obr. 19 Hardwarové řešení diagnostické jednotky | 37 |
| Obr. 20 Ukázka prostředí programu Automation Studio 4.4 | 38 |
| Obr. 21 Nastavení funkce MpDataRecorder | 39 |
| Obr. 22 Uložené hodnoty pomocí funkce MpDataRecorder, zobrazeno v programu MS Excel 2013..... | 39 |
| Obr. 23 Část programu LoadData..... | 40 |
| Obr. 24 Výřez uložených dat o využití stroje, zobrazeno v programu MS Excel 2013 | 42 |
| Obr. 25 Hlavní karta uživatelského rozhraní | 43 |
| Obr. 26 HSS frézovací nástroj | 44 |
| Obr. 27 Obrobek | 45 |
| Obr. 28 Znázornění pozice nástroje a obrobku..... | 45 |
| Obr. 29 3D mikroskop Alicona InfiniteFocus | 46 |
| Obr. 30 Oblast přechodu mezi opotřebovanou a neopotřebovanou částí břitů nástroje | 47 |
| Obr. 31 Měření opotřebení | 47 |
| Obr. 32 Graf závislosti opotřebení břitů nástroje na čase v záběru | 48 |
| Obr. 33 frekvenční spektrum signálu vibrací v 1. průjezdu | 49 |
| Obr. 34 FFT frekvenční signálu vibrací v 10. průjezdu (čas nástroje v záběru 900s) | 49 |
| Obr. 35 Časový průběh vibrací (nástroj 3, průjezd 8) | 50 |
| Obr. 36 Graf závislosti celkového úhrnu RMS rychlosti vibrací ve směru x na čase v záběru při radiálním posuvu 0,5mm | 51 |
| Obr. 37 Graf závislosti celkového úhrnu RMS rychlosti vibrací ve směru x na čase v záběru při radiálním posuvu 2mm | 51 |
| Obr. 38 Graf závislosti celkového úhrnu RMS rychlosti vibrací ve směru x na čase v záběru při radiálním posuvu 2mm – nástroje 5-9 | 52 |
| Obr. 39 Graf závislosti RMS rychlosti vibrací na zubové frekvenci ve směru x na čase v záběru při radiálním posuvu 2mm | 52 |
| Obr. 40 Graf závislosti RMS rychlosti vibrací na zubové frekvenci ve směru y na | |

| | |
|---|----|
| čas v záběru při radiálním posuvu 2mm | 53 |
| Obr. 41 Směr maximální síly F a její rozložení do směru os x a y..... | 53 |
| Obr. 42 Zlomená HSS fréza | 54 |
| Obr. 43 Drážka v obrobku způsobená špatným upnutím nástroje..... | 55 |
| Obr. 44 Průběh vibrací dle ČSN ISO 10816 (pásmo 10-1000Hz) zlomeného nástroje | 55 |
| Obr. 45 Průběh vibrací v oblasti zubové frekvence zlomeného nástroje | 56 |
| Obr. 46 Průběh zatížení vřetena před zlomením nástroje | 56 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Základní vlastnosti akcelerometru 0ACS100A.90-1 | 33 |
| Tab. 2 základní vlastnosti teplotního snímače Lion P016-4050 | 35 |
| Tab. 3 Rozdělení stavu stroje | 40 |
| Tab. 4 Hodnocení strojů na základě RMS rychlosti vibrací [25] | 40 |
| Tab. 5 rozdělení stavu obráběcího stroje dle RMS rychlosti vibrací | 41 |
| Tab. 6 Řezné podmínky | 45 |
| Tab. 7 Přehled měřících zařízení Brüel&Kjaer | 48 |
| Tab. 8 Nastavení prahových hodnot pro monitorování opotřebení nástroje | 54 |